



**Universidad**  
Zaragoza

## Proyecto Fin de Carrera

# Diseño y Caracterización de un Conversor de Longitud de Onda basado en un Interferómetro Mach-Zenhder y Amplificadores Ópticos de Semiconductor

Autor

José Antonio Altabás Navarro

Director

Juan Ignacio Garcés Gregorio

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Febrero 2013



# **Diseño y Caracterización de un Conversor de Longitud de Onda basado en un Interferómetro Mach-Zehnder y Amplificadores Ópticos de Semiconductor - Resumen**

Este proyecto forma parte del proyecto PEGASO (Matrices de puertas lógicas basadas en amplificadores ópticos de semiconductor) del Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A).

El proyecto consiste en la caracterización lineal y no lineal de un Amplificador Óptico de Semiconductor No Lineal (SOA-NL) y el diseño de un conversor de longitud de onda basado en un Interferómetro Mach-Zehnder con Amplificadores Ópticos de Semiconductor (SOA-MZI).

En primer lugar, se realiza un análisis teórico de los SOAs y de los interferómetros. El estudio de los SOAs se basa en la descripción de sus características básicas así como de las no linealidades más importantes que se presentan en el mismo, las cuales son la Modulación de Ganancia Cruzada (XGM), la Modulación de Fase Cruzada (XPM) y la Mezcla de Cuatro Ondas (FWM). El análisis de los interferómetros consiste en la exposición del proceso de la interferometría, el estudio de los interferómetros típicos utilizados en óptica integrada, los cuales son el Interferómetro Michelson (MI), el Interferómetro Mach-Zehnder y el Interferómetro Sagnac (IS), y del SOA-MZI.

Además, en esta primera parte se exponen distintas aplicaciones en las que se puede utilizar los SOA. Estas aplicaciones van desde amplificadores ópticos en redes de comunicaciones hasta puertas lógicas ópticas, pasando por conversores de longitud de onda y conmutadores.

En segundo lugar, se lleva a cabo la caracterización lineal y no lineal de un SOA. La caracterización lineal consiste en obtener la ganancia y la potencia de salida del SOA en función de la potencia de entrada, la intensidad de alimentación del SOA, la longitud de onda de entrada al SOA y de la temperatura de operación del SOA, así como la obtención del espectro de emisión del SOA en función de la potencia de entrada.

La caracterización no lineal se basa en el análisis de la XGM y la XPM del SOA. El estudio de la XGM ha consistido en observar la diferencia de potencia entre el nivel alto y el bajo de salida del SOA en función de la potencia de las señales de entrada y del retardo temporal que había entre las dos. El análisis de la XPM se ha basado en la obtención de la diferencia de fase entre el nivel alto y el bajo de salida del SOA en función de la potencia de las señales de entrada.

Finalmente, se ha realizado el diseño del conversor de longitud de onda de dos salidas (inversa y no inversa) basado en un SOA-MZI. Después de tener el concepto teórico desarrollado, se han realizado simulaciones con el programa de simulación VPI para obtener una primera aproximación del comportamiento del sistema y poder ajustar los parámetros antes de llevarlo a la práctica. Más tarde se ha procedido a la prueba del concepto mediante el montaje del conversor de longitud de onda con elementos discretos, demostrando que el sistema tiene el comportamiento esperado pero con una baja estabilidad debida a elementos coyunturales. Por último, se ha diseñado el sistema integrado para su fabricación en la plataforma de integración óptica JePPIX del Instituto COBRA de la Universidad Técnica de Eindhoven (TUE).

## **Palabras Claves**

Dispositivo óptico; Conversor de Longitud de Onda; Inversor; SOA; Interferometría; SOA-MZI; XGM; XPM





*A mis padres Manuel y Encarna  
y a mi abuelo Antonio*



## Agradecimientos

*Gracias a mis padres por todo el apoyo que me han dado durante estos años, por el esfuerzo que les ha supuesto que haya llegado hasta aquí, por soportarme en los malos momentos y por disfrutar conmigo de los éxitos.*

*Gracias a mi abuelo que nunca pensó que llegaría a ver este momento y que tanto trabajó para que pudiera hacerse realidad.*

*Gracias a Nacho por darme la oportunidad de trabajar en este grupo y por ayudarme a realizar este proyecto aunque esto supusiera una interrupción de su trabajo.*

*Gracias a Miguel y Félix por la ayuda que me han prestado durante todo este proyecto y por todo el tiempo que han dedicado a que este proyecto haya llegado a buen puerto.*

*Gracias a Leticia por sus sugerencias en la realización de la presentación y del proyecto.*

*Gracias a Patricia por todos sus consejos y por la ayuda que me ha prestado en la corrección de la memoria.*



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Fundamentos Teóricos</b>	<b>3</b>
2.1. Amplificadores Ópticos de Semiconductor (SOA) . . . . .	3
2.1.1. Modulación de Ganancia Cruzada (XGM) . . . . .	4
2.1.2. Modulación de Fase Cruzada (XPM) y Automodulación de Fase (SPM) .	5
2.1.3. Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) . . . . .	5
2.2. Interferometría . . . . .	6
2.3. Aplicaciones Generales de SOA . . . . .	8
<b>3. Caracterización del Amplificador Óptico de Semiconductor</b>	<b>11</b>
3.1. Ganancia del SOA . . . . .	11
3.2. No linealidades del SOA . . . . .	14
<b>4. Conversor de Longitud de Onda</b>	<b>19</b>
4.1. Concepto . . . . .	19
4.2. Simulaciones . . . . .	20
4.3. Resultados Experimentales . . . . .	25
4.4. Diseño Integrado . . . . .	27
<b>5. Conclusión</b>	<b>29</b>
<b>A. Material Semiconductor. Interacción entre la materia y la luz</b>	<b>I</b>
<b>B. Montajes experimentales</b>	<b>VII</b>
B.1. Montaje para caracterizar la ganancia y potencia de salida de un SOA . . . . .	VII
B.2. Montaje para obtener el espectro de emisión del SOA . . . . .	IX
B.3. Montaje para caracterizar XGM del SOA . . . . .	X
B.4. Montaje para caracterizar XPM del SOA . . . . .	XII
B.5. Montaje de simulación con modulación RZ . . . . .	XIV
B.6. Montaje de simulación con modulación NRZ . . . . .	XV
B.7. Montaje del conversor de longitud de onda . . . . .	XVI
<b>C. Hojas de especificaciones</b>	<b>XIX</b>
C.1. Características generales del chip en JePPIX . . . . .	XIX
C.2. Especificaciones del SOA-NL de CIP . . . . .	XXI
<b>Índice de figuras</b>	<b>XXV</b>
<b>Índice de acrónimos</b>	<b>XXVII</b>



# Capítulo 1

## Introducción

Este proyecto se encuadra dentro en el proyecto PEGASO (Matrices de puertas lógicas basadas en amplificadores ópticos de semiconductor) del Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A).

El proyecto PEGASO tiene como objetivo desarrollar un elemento lógico básico (BLE) todo óptico de los futuros procesadores ópticos. Para realizar este elemento básico es necesario desarrollar una tabla de consulta o look-up table (LUT) de cuatro bits y un flip-flop óptico.

Este proyecto forma parte del desarrollo de la LUT, ya que se basa en un grupo de NOR que utilizan las cuatro entradas y sus negadas para conseguir todas las salidas combinaciones lógicas posibles a su salida. Además, para poder crear un elemento lógico totalmente funcional, este debe ser independiente de la longitud de onda de entrada. Para conseguir la entrada inversa y tener independencia de la longitud de onda de las entradas se debe realizar un conversor de longitud de onda que produzca tanto la salida inversa como la no inversa.

Este proyecto se puede dividir en dos partes: la primera de ellas consiste en la caracterización lineal y no lineal de un Amplificador Óptico de Semiconductor No Lineal (SOA-NL) y la segunda consiste en la realización de un conversor de longitud de onda de dos salidas (inversa y no inversa) utilizando una configuración de Interferómetro Mach-Zehnder con Amplificadores Ópticos de Semiconductor (SOA-MZI).

Lo primero que se realiza en este proyecto es un estudio teórico de los SOA y de la interferometría, así como de las aplicaciones generales de los SOA y de estos en esquemas interferométricos.

En la segunda sección se hace el análisis de la ganancia lineal y la potencia de saturación del SOA-NL en función de la intensidad del SOA, de la longitud de onda y de la temperatura del SOA. Además, también se muestra el espectro de emisión del SOA-NL en función de la potencia de la señal de entrada.

Por otro lado, en la segunda parte también se realiza un análisis de dos no linealidades del SOA-NL, la modulación de ganancia cruzada (XGM) y la modulación de fase cruzada (XPM). XGM ha sido estudiada en función de la potencia de las dos señales de entrada, una la de bombeo o moduladora (pump) y otra la señal a modular (probe), y el retardo de llegada al SOA entre el pump y probe. XPM se ha estudiado en función de la potencia del pump y del probe.

En la tercera parte se va a realizar un conversor de longitud de onda basado en XPM del SOA en un SOA-MZI. Este conversor de longitud de onda produce dos salidas en la longitud de onda del probe, una con los mismos datos que modulan el pump (salida no inversa) y otra con

los datos inversos (salida inversa). Este conversor es simulado mediante VPI para ajustar los parámetros de operación adecuados: la intensidad de alimentación de los SOAs, el delay entre las señales de entrada para la modulación RZ, el esquema concreto de inyección del pump, y las potencias de entrada del pump y del probe; en relación con los datos obtenidos previamente en la caracterización. Después de ellos se lleva a cabo el montaje con elementos discretos del conversor para realizar una prueba de concepto del mismo. Finalmente, se realiza el diseño del dispositivo integrado en InP en la plataforma de integración fotónica JePPIX del Instituto COBRA de la Universidad Técnica de Eindhoven (TUE). El posterior testeo del sistema integrado queda fuera del proyecto debido a los plazos de fabricación de la plataforma.



## Capítulo 2

# Fundamentos Teóricos

En este capítulo se van a explicar los Amplificadores Ópticos de Semiconductor (SOA) y la interferometría. Esto va a sentar las bases teóricas de la caracterización del SOA, lo que se realizará en la sección 3, y del diseño del conversor de longitud de onda, realizado en la sección 4. El diseño del conversor de longitud de onda se basa en un SOA-MZI, por lo que en esta sección se comentaran los aspectos teóricos básicos que luego intervendrán en su desarrollo. Además, se comentaran las aplicaciones de los SOA no lineales en diferentes configuraciones y funciones. En este último apartado también se comentaran de forma resumida las bases de funcionamiento del proyecto principal en el que se encuadra este Proyecto Fin de Carrera. Para obtener más información de la interacción entre la materia y la luz, y del comportamiento de los semiconductores se puede consultar el Apéndice A.

### 2.1. Amplificadores Ópticos de Semiconductor (SOA)

En esta sección se van a comentar las características de los Amplificadores Ópticos de Semiconductor (SOA). Para realizar este apartado se han consultado diferentes materiales: el libro [1], los apuntes de la asignatura de Comunicaciones Ópticas [2] y los artículos [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12] y [13].

Los SOAs son dispositivos optoelectrónicos que pueden amplificar la luz. Para que la amplificación se produzca es necesario que una fuente eléctrica externa aporte energía a la zona activa del SOA. La luz debe ser confinada en la zona activa mediante una guía de ondas, aunque este confinamiento es débil y parte de la luz se propaga por zonas con altas pérdidas. En esta zona activa se produce la amplificación de la luz mediante los procesos de recombinación radiativa de los portadores, los cuales han sido explicados en el Apéndice A. La amplificación de la luz introduce ruido por emisión espontánea, el cual no puede ser eliminado totalmente.

Dependiendo de cómo sean las caras finales del amplificador se puede distinguir entre dos tipos: Fabry-Perot SOA (FP-SOA) y Traveling Wave SOA (TW-SOA). En FP-SOA las reflexiones en las caras son significativas y por tanto se produce un rizado en la ganancia. Por el contrario, en TW-SOA no hay reflexiones en las interfaces, debido a los revestimientos antirreflejantes o anti-reflection coating (ARC). TW-SOA son más independientes de la temperatura, la polarización y de las fluctuaciones de la intensidad de alimentación.

Hay multitud de parámetros de diseño en SOA que pueden modificar las propiedades del mismo. Estos parámetros pueden venir determinados por la elección del punto de trabajo del SOA, como por ejemplo la intensidad de alimentación o la temperatura del SOA, o por la fabricación del mismo, tales como la elección del material, la estructura de capas elegida, la estructura de la guía de onda, las dimensiones del sistema, la existencia de ARC o no, el tipo de

zona activa utilizada (bulk o quantum well) entre otros, que son explicados en más profundidad en el Apéndice A. Estos parámetros de diseños afectan al espectro óptico de ganancia, a la dependencia de la polarización del dispositivo, a la potencia de saturación o a la dinámica de la ganancia, entre otros.

Las no linealidades del SOA pueden provocar un ensanchamiento o chirp en la frecuencia y generar productos de intermodulación de segundo y tercer orden. Las principales no linealidades de los SOAs son la modulación de ganancia cruzada (XGM), la modulación de fase cruzada (XPM), la automodulación de fase (SPM) y la mezcla de cuatro ondas (FWM) y serán descritas con más detenimiento a continuación.

### 2.1.1. Modulación de Ganancia Cruzada (XGM)

El SOA amplifica todas las señales que tienen longitud de onda dentro de su espectro de ganancia, por lo que los cambios en la densidad de portadores ocasionados por una de las señales afectan al resto de señales que entran en el SOA. La señal de más potencia (pump) satura la ganancia y por tanto modula la amplitud de la señal de menor intensidad (probe).

El tiempo de subida en la salida viene dado por la anchura del pulso en el pump, mientras que el tiempo de bajada depende del tiempo de vida medio de los portadores, lo que hace que la señal de salida quede distorsionada por la dinámica de la ganancia. El proceso de XGM provoca un chirp relativamente grande en la señal de salida. En el flanco de subida del pulso de salida provoca un desplazamiento hacia el azul (chirp positivo), mientras que en el flanco de bajada del pulso se desplaza hacia el rojo (chirp negativo). El chirp negativo es mayor que el positivo, debido a que el tiempo de subida es mayor que el de bajada. Esto provoca un ensanchamiento del espectro. Además, en el borde de subida se produce un sobreimpulso y en el de bajada un subimpulso, lo cual se debe a la diferencia entre el tiempo de vida de los fotones y el de los portadores.

Tal y como se explica en el artículo [4], la respuesta de la potencia de salida ante un pulso corto del pump sigue la “forma de onda XGM teórica”, la cual es

$$I(t) = I_0 \{1 - \Delta T \exp(-t/\tau)\} \quad (2.1)$$

donde  $I_0$  es la potencia de salida sin pulso del pump,  $\Delta T$  es el ratio de supresión de ganancia inicial y  $\tau$  es el tiempo de recuperación de la ganancia.

El tiempo de recuperación se incrementa ligeramente cuando se incrementa la energía del pulso. Además, cuando el pump y el probe son lanzadas al SOA en esquema contrapropagante el tiempo de recuperación se reduce con respecto a si son lanzadas en esquema copropagante; lo cual se produce porque la depleción de los portadores no es simétrica en el SOA y por lo tanto la supresión de ganancia es ligeramente distinta en los dos casos, tal y como se indica en el artículo [5].

Asimismo, XGM es un proceso independiente de la polarización de las señales de entrada.

Cuando el pump está modulado y satura el SOA, impone la misma modulación en el probe con la excepción de que los datos en el probe están invertidos con respecto a los datos del pump, por lo que la función booleana del SOA sería 2.2, como se indica en los artículos [6] y [7].

$$signal_{out} = signal_{probe} \cdot \overline{signal_{pump}} \quad (2.2)$$

### 2.1.2. Modulación de Fase Cruzada (XPM) y Automodulación de Fase (SPM)

El índice de refracción del SOA no es constante, sino que depende de la densidad de los portadores. Por ello, cuando un pulso viaja a través del SOA este cambia la densidad de portadores y de ese modo el índice de refracción del medio. Este cambio en el índice de refracción provoca cambios en la fase de una señal que viaja a través del SOA (automodulación de fase o SPM) o en el resto de las señales que viajan junto a ella (modulación de fase cruzada o XPM).

Un montaje típico en el que aparece XPM es cuando dos señales, una de alta potencia (pump) y otra de baja potencia (probe), son amplificadas en un SOA. En este proceso se produce un cambio relativo de la fase en las señales debido a la interacción de los dos campos ópticos. El cambio de fase que provoca el pump en el probe es más significativo debido a que el pump provoca un fuerte cambio en el índice de refracción.

En el artículo [4], la respuesta de la desviación de fase de la salida ante un pulso corto del pump sigue la forma de la siguiente ecuación

$$\Delta\phi(t) = \Delta\phi_0 \exp(-t/\tau) \quad (2.3)$$

donde  $\Delta\phi_0$  es la desviación de fase de la salida provocada por un pulso corto de pump y  $\tau$  es el tiempo de recuperación de la fase, el cual coincide con el tiempo de recuperación de la ganancia de XGM.

El espectro de la señal modificada por XPM es más ancho que el de la señal original y depende de la tasa de la modulación. Para tasas de datos altas el SOA no tiene tiempo de recuperarse completamente y por tanto el efecto del XPM se reduce.

En el flanco de subida se produce un pequeño desplazamiento hacia el rojo (chirp negativo) y en los flancos de bajada un pequeño desplazamiento de la fase hacia el azul (chirp positivo), lo que provoca una compresión del pulso hacia la región de dispersión anómala. Este chirp frecuencial es mucho menor que el que se produce en XGM.

El desplazamiento de fase para una misma supresión de ganancia es mayor cuando las señales entran al SOA en modo contrapropagante que cuando entran en modo copropagante. Esto se debe a que la depleción de los portadores no es simétrica en el SOA y por tanto el cambio de fase es ligeramente diferente en los dos modos, como es explicado en el artículo [5].

En los artículos [8] y [9] se analiza la Transient XPM (T-XPM). Este tipo de no linealidad se obtiene realizando el filtrado de la banda lateral de la señal de salida de tal manera que se rechaza la longitud de onda de la portadora. Este filtro está desplazado hacia el azul con respecto de la portadora.

### 2.1.3. Mezcla de Cuatro Ondas (FWM)

La mezcla de cuatro ondas (FWM) es un proceso no lineal coherente que ocurre en un SOA entre dos campos ópticos, un pump a frecuencia  $\omega_0$  y un probe a frecuencia  $\omega_0 - \Omega$  que tienen la misma polarización. El pump y el probe provocan que la ganancia del SOA se module con la frecuencia de batido  $\Omega$  y produce un nuevo campo óptico a frecuencia  $\omega_0 + \Omega$ . El nuevo campo es conjugado y por tanto tiene la fase opuesta del probe.

La FWM para frecuencias relativamente bajas de batido esta generada por la modulación de la densidad de portadores, por lo que solo se manifiesta a unas decenas de GHz. Por el contrario, para frecuencias relativamente altas depende de mecanismos no lineales que afectan a la ganancia como el Spectral Hole Burning (SHB) y el Carrier Heating (CH).

El SBH consiste en la aparición de un hueco en la densidad de portadores, lo que produce una modulación rápida de la ganancia. El CH es causado por la emisión estimulada y por la absorción de portadores libres que hacen que aumente la temperatura media del sistema, lo que disminuye la ganancia.

Hay que resaltar que este proceso es altamente dependiente de la polarización, pero se puede solucionar introduciendo dos pumps junto al probe a diferentes longitudes de onda. Si estos dos pumps son ortogonales, la señal de salida será la conjugada del probe; mientras que si los dos pumps son co-polarizados, la señal de salida estará en fase con el probe. Esta solución ante la dependencia de la polarización es explicada en profundidad en el libro [1].

## 2.2. Interferometría

En esta sección se va a analizar el fenómeno de las interferencias y algunos de los interferómetros típicos. Para realizar este análisis se han utilizado los libros [1] y [14].

Las interferencias ocurren cuando dos señales provenientes de la misma fuente óptica se superponen y la potencia en el área de superposición varía entre un valor que es superior a la suma de las dos potencias originales y cero.

La potencia de la interferencia entre los dos rayos sigue la siguiente ecuación:

$$P = P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos(\phi) \quad (2.4)$$

donde  $P_1$  es la potencia del primer rayo,  $P_2$  es la potencia del segundo rayo y  $\phi$  es el desfase entre los dos rayos. El máximo de potencia se obtiene cuando la interferencia es constructiva:

$$P_{max} = P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \quad (2.5)$$

la cual ocurre cuando  $\phi = 2n\pi$  con  $|n| = 0, 1, 2, \dots$ . El mínimo de potencia aparece cuando la interferencia es destructiva:

$$P_{min} = P_1 + P_2 - 2\sqrt{P_1 P_2} \quad (2.6)$$

la cual ocurre cuando  $\phi = (2n + 1)\pi$  con  $|n| = 0, 1, 2, \dots$ . Si los dos rayos son simétricos, es decir, la potencia se ha dividido por igual entre los dos rayos, la potencia de la señal interferente variará entre  $4P_1$  y 0.

Además, se deben comentar las causas por las que la interferencia puede no producirse correctamente. En primer lugar, los caminos que recorre la luz deben ser exactamente iguales o al menos su diferencia debe ser menor que la longitud de coherencia de la fuente ( $L_c$ ):

$$L_c = \frac{c}{n\Delta\nu} \quad (2.7)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $n$  es el índice de refracción del medio y  $\Delta\nu$  es el ancho de línea del láser o el ancho de banda de la modulación para un láser monocromático. Por ello cuando la diferencia entre los caminos de la luz es mayor que la longitud de coherencia no se produce la interferencia.

En segundo lugar, para que se produzca la interferencia entre los dos haces de luz estos deben tener la misma polarización, ya que si las componentes son ortogonales entre ellas no interactúan y no se producirá la interferencia. Estos dos factores se pueden añadir a la ecuación 2.4, obteniéndose la ecuación 2.8.

$$P_{min} = P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} f(L) g(Pol) \cos(\phi) \quad (2.8)$$

donde  $f(L)$  nos indica si las señales están o no dentro de la longitud de coherencia y  $g(Pol)$  es la función de que nos da la relación entre la polarización de la señales. Tanto la función  $f(L)$  como  $g(Pol)$  varían entre 0 y 1, valiendo 0 cuando la interferencia no se produce y 1 cuando la interferencia se produce perfectamente.

En óptica integrada se suelen utilizar interferómetros para utilizar no linealidades como la XPM o realizar diferentes dispositivos. Los interferómetros típicos en óptica integrada son el Interferómetro Michelson (MI), el Interferómetro Mach-Zehnder (MZI) y el Interferómetro Sagnac (SI). Estos interferómetros realizados en aire se pueden ver la figura 2.1.

Si el Interferómetro Michelson se realiza mediante espejos, consiste en una superficie semireflectora que divide el rayo. Estos dos nuevos rayos se reflejan en dos espejos a distinta distancia y vuelven a recombinarse en la misma superficie semireflectora, dando lugar a la interferencia. En el caso de que el MI se realice en óptica integrada la división y recombinación se realiza mediante un divisor o un acoplador y los reflectores se colocan al final de las dos guías de salida del divisor.

Cuando el Interferómetro Mach-Zehnder es en el aire, la división del haz de luz original se realiza mediante una superficie semireflectora. Estos dos rayos van a dos espejos que direccionarán los rayos de luz hacia una superficie semireflectora diferente, y está los recombinará dando lugar a un rayo interferente. Si el MZI es realizado en óptica integrada se utilizan dos acopladores o dos divisores que sirven para dividir el rayo de luz original y recombinarlo posteriormente. Estos dos divisores se unen mediante dos guías de onda que pueden tener distinta longitud. Este interferómetro da suficiente libertad a los caminos que recorren los dos rayos.

En el Interferómetro Sagnac realizado en el aire, la división del rayo es realizada por una superficie semireflectora. Estos dos rayos recorren el mismo camino pero en sentidos opuestos, reflejándose en tres espejos y volviendo a recombinarse en la misma superficie semireflectora. Cuando el SI se implementa en óptica integrada se realiza con un acoplador y una guía que sirve de bucle entre las dos salidas del acoplador. Este acoplador realiza la división y la recombinación de la luz.

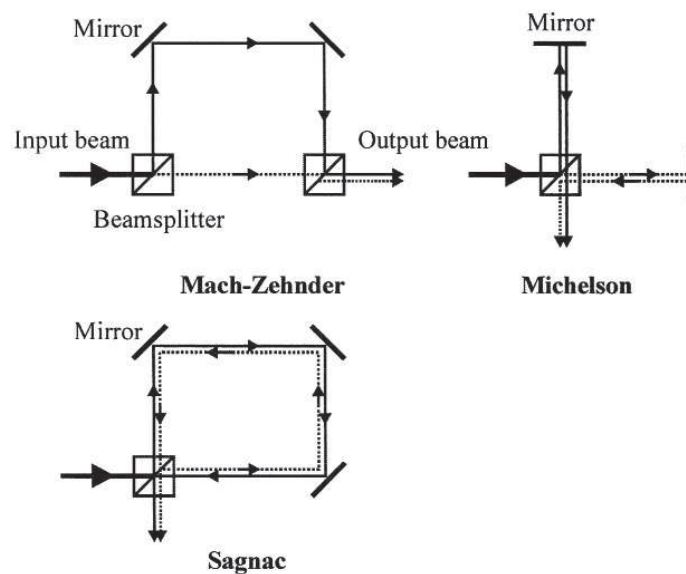


Figura 2.1: Interferómetros usados típicamente en Óptica Integrada. Esta imagen ha sido tomada de [1].

Por último, una configuración interferométrica típica en la que se utilizan SOAs son los SOA-MZI. Los SOA-MZI tienen un SOA en cada brazo del MZI; y dentro de esta configuración se puede diferenciar entre el esquema asimétrico y el simétrico. En el sistema es asimétrico, la potencia inyectada en cada brazo es diferente y por tanto los cambios en la fase también son asimétricos, gracias a esta asimetría no son necesarias entradas adicionales para la señal de control o pump. Cuando el sistema es simétrico es necesario colocar una entrada adicional a uno de los dos SOAs para poder inyectarle el pump de forma independiente y conseguir así el desfase necesario.

## 2.3. Aplicaciones Generales de SOA

En esta sección se van a comentar algunas de las aplicaciones que tienen los SOA y sus combinaciones con interferómetros. Como bases para estos comentarios se han utilizado el libro [1] los apuntes de la asignatura de Comunicaciones Ópticas [2] y los artículos [5], [6], [7], [8], [12], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21] y [22].

Las aplicaciones de los SOAs son muy amplias. Por un lado, están las funciones típicas de un amplificador en una red de comunicaciones, aunque en este campo son mucho más utilizados otro tipo de amplificadores como los Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA). Por otro lado, están las funciones de procesamiento óptico de señales de comunicaciones ópticas aprovechando las no linealidades del SOA.

La función más básica de un SOA es la de amplificador en una red de comunicaciones. Dentro de este uso se pueden distinguir distintas funciones: la función de amplificador de potencia o booster, la de amplificadores de línea y la de preamplificadores.

El booster tiene la función de incrementar la potencia de la señal a la entrada del sistema de transmisión. Gracias a este dispositivo se puede realizar enlaces de medio alcance sin necesidad de otro tipo de amplificadores, reducir el número de amplificadores de línea en los enlaces de largo alcance y aumentar el ratio de división de las redes de distribución.

La función de los amplificadores de línea es compensar las pérdidas en los sistemas de largo alcance en los que la dispersión no es un factor limitante.

Los preamplificadores se usan para incrementar la potencia de la señal antes de que sea demodulada, por lo que se incrementa la sensibilidad del receptor y mejora el balance de potencia. En sistemas de transmisión coherente, los preamplificadores basados en SOAs presentan problemas debido al incremento del ruido de disparo.

En cuanto a las funciones de procesamiento óptico de señales se van a explicar algunos dispositivos ópticos como conversores de longitud de onda, conmutadores o puertas lógicas.

Por un lado, se van a comentar los conversores de longitud de onda basados en XGM. Estos conversores invierten la señal y tienen una respuesta relativamente lenta por lo que distorsionan ligeramente la señal. Dentro de este tipo de conversores se pueden diferenciar dos esquemas diferentes: copropagante y contrapropagante. En el esquema contrapropagante, el probe y el pump se inyecta al SOA en sentidos opuestos, por lo que no hace falta filtrar la señal de salida para eliminar el pump. En el esquema copropagante, el probe y el pump se inyectan al SOA en el mismo sentido, por lo que hace falta filtrar la señal a la salida, lo que hace que la señal de salida tenga menos ruido. Mediante este último esquema se puede mejorar la respuesta temporal del conversor en el caso de que se coloquen varios SOAs en cascada separados por aisladores. Además, los conversores XGM introducen un chirp considerable, que puede reducirse si se selecciona el filtro adecuado en el esquema copropagante.

Por otro lado, se van a presentar los conversores de longitud de onda basadas en XPM. Para poder utilizar XPM es necesario situar uno o dos SOAs en un interferómetro. Estos sistemas son más eficientes que los basados en XGM y además reducen el chirp. La configuración más típica para utilizar XPM es el SOA-MZI, tanto simétrico como asimétrico, cuya descripción puede verse en la sección 2.2. Dependiendo del punto de trabajo del conversor la señal de salida será invertida o no. El proceso por el que se produce el cambio de fase, puede descompensar la ganancia de los SOAs y por lo tanto reducir el ratio de extinción. Como se puede ver en el artículo [15], si la señal de entrada es NRZ, el probe debe ser una señal continua, mientras que si es RZ, el probe debe ser un reloj para evitar que se invierta la modulación a la salida.

Finalmente, se comentaran los conversores de longitud de onda basados en FWM. Debido al FWM se genera una nueva señal que es una réplica inversa de la señal de entrada. Filtrando la señal de salida se consigue realizar la conversión. Para obtener un esquema que sea independiente de la polarización se debe realizar un sistema con pump dual, tal y como se indica en la sección 2.1.3.

Además, mediante SOAs se pueden realizar conmutadores ópticos. Una de las configuraciones posibles es utilizar XGM para reducir la ganancia del sistema, y así bloquear la señal no deseada. Otro método es el uso un SOA-MZI en el cual se puede seleccionar la salida mediante una señal de control. Otro sistema es Nonlinear Optical Loop Mirror (NOLM) que está basado en un interferómetro Sagnac y es un switch óptico de alta velocidad, como puede verse en el artículo [12].

Por último, se va a comentar la posibilidad de realizar puertas lógicas basadas en SOAs. La realización de puertas lógicas basadas en SOAs se basa en la obtención de una señal de salida que sea una combinación lógica de las entradas a la misma. Combinando dos señales de distinta potencia (pump y probe) en un SOA se consigue que aparezca XGM entre las dos señales y la señal producida sea una combinación lógica de estas dos señales, que se rige por la función booleana de XGM (ec. 2.2). Mediante la combinación de este tipo de salidas se pueden realizar distintas puertas lógicas, tal y como se explica en algunos de los siguientes casos. En el artículo [6] se presenta una AND realizada mediante dos SOAs. En este sistema se utiliza un SOA para negar la primera entrada, la cual hará de pump en la función booleana de XGM (ec. 2.2) con un probe continuo. Después, se introduce la negada de la primera entrada como pump y la segunda entrada como probe al otro SOA, y obteniéndose mediante la ec. 2.2 la AND ( $AND = A \cdot \overline{B} = A \cdot B$ ). En el artículo [7] se realiza una NAND utilizando dos SOAs, en el primero de ellos se aplica la función booleana de XGM (ec. 2.2), utilizando la primera entrada como pump y la segunda como probe, y en el segundo se niega la primera de las entradas, que hará de pump sobre un probe continuo mediante la ec. 2.2. Después se combinan las salidas de los SOA para obtener la NAND ( $NAND = A \cdot \overline{B} + \overline{A}$ ). En el artículo [16] se consigue realizar una XOR con dos SOAs. En los SOAs se aplica la función booleana de XGM (ec. 2.2) pero con las entradas intercambiadas y uniendo las salidas de los SOAs se obtiene la XOR ( $XOR = A \cdot \overline{B} + \overline{A} \cdot B$ ). En el artículo [17] se desarrolla un XNOR mediante dos no linealidades del SOA, FWM y XGM, el mismo SOA. Mediante FWM entre las dos señales de entrada y el reloj se consigue realizar una puerta AND. Las dos señales de entrada provocan XGM en la señal de reloj por lo que se obtiene así una NOR. Estas dos señales son filtradas a sus respectivas longitudes de onda, ecualizadas y acopladas para obtener la XNOR. La AND y la NOR son producidas en distinta longitud de onda, a no ser que se introduzca el reloj a la misma longitud de onda y con polarización ortogonal a la que produzca el FWM. En el artículo [8] se realizan una XNOR, AND, NOR, OR y NOT sobre un mismo SOA dependiendo de las señales introducidas y los filtrados realizados a la salida. La AND, NOR y XNOR se producen utilizando el mismo sistema que en el artículo [17], aunque la NOR es filtrada con un filtro ligeramente desplazado hacia el azul para aumentar la velocidad de la puerta lógica. El OR es

realizado mediante T-XPM, tal y como se indica en la sección 2.1.2. La NOT tiene el mismo funcionamiento que la NOR pero con una sola entrada.

También se pueden conseguir realizar puertas lógicas mediante SOA-MZI. En el artículo [18], se muestra una XOR realizada mediante un SOA-MZI en el que las señales se introducen con distinto retardo en las dos entradas del acoplador de entrada. Cuando los datos no coinciden, el SOA-MZI queda desbalanceado y por tanto hay un uno a la salida. En el artículo [19], se realiza una AND utilizando un conversor de longitud de onda SOA-MZI en el que el probe es una de las señales de entrada y el pump es la otra. En el artículo [20] se realiza una XOR, NOR, OR y NAND mediante dos SOA-MZIs. La XOR es realizada mediante la inyección de una señal de entrada a uno de los brazos del primer SOA-MZI y la inyección de la otra al otro brazo de ese mismo SOA-MZI y una onda continua (CW) como probe. La NOR y la OR se realizan mediante la inyección de las dos señales de entrada a uno de los brazos del segundo SOA-MZI y una CW como probe. La diferencia entre NOR y OR, se basa en que cuando se introduce un desfase adicional de  $\pi$  al brazo por el que circulan las señales de entrada se realiza la OR. Combinando la XOR y la NOR se consigue realizar la NAND.

Finalmente, se va a comentar como son utilizados en el proyecto PEGASO los SOA para realizar una LUT de cuatro bits. La base de esta LUT es la realización de una NOR de 4 bits con un SOA. Para realizar esta NOR se aplica la función booleana de XGM (ec. 2.2) en la que los datos actúan de pump y el probe es una señal de reloj (todo '1's)  $NOR = signal_{probe} \cdot \overline{signal_{pump1}} \cdot \overline{signal_{pump2}} \cdot \overline{signal_{pump3}} \cdot \overline{signal_{pump4}} = '1' \cdot \overline{A} \cdot \overline{B} \cdot \overline{C} \cdot \overline{D}$ . Utilizando 16 NOR en las que se realizan todas las combinaciones posibles de las entradas y sus negadas, se consigue una LUT de 4 bits totalmente funcional mediante la activación o no de los SOAs disponibles. Para obtener más información sobre el proyecto PEGASO se puede consultar el artículo [22].



## Capítulo 3

# Caracterización del Amplificador Óptico de Semiconductor

En este capítulo se va a caracterizar un Amplificador Óptico de Semiconductor No Lineal (SOA-NL). Esta caracterización es el paso previo al diseño de conversor de longitud de onda, ya que nos permite validar las simulaciones realizadas mediante el programa de simulación VPI. Además, con los datos que se obtengan de la caracterización del SOA se podrán aproximar algunos de los parámetros que se utilizaran en el diseño y simulación del sistema, tomándolos de esa manera como punto de partida en las simulaciones.

En la primera sección se va a realizar la caracterización básica de un SOA-NL comercial de la compañía CIP, cuyas especificaciones se adjuntan en el Apéndice C.2. Esta caracterización se basa en el análisis de la ganancia y la potencia de salida ( $P_{OUT}$ ) en función de la potencia de entrada ( $P_{IN}$ ), la longitud de onda ( $\lambda$ ), la intensidad de alimentación del SOA ( $I_{SOA}$ ) y la temperatura en el SOA ( $T_{SOA}$ ). Además, se estudiará el espectro de emisión del SOA-NL.

En la segunda sección se van a estudiar las no linealidades del SOA-NL. En esta parte se va a analizar la modulación de ganancia cruzada (XGM) y la modulación de fase cruzada (XPM) en función de la potencia de la señal original o probe ( $P_{probe}$ ) y la de bombeo o pump ( $P_{pump}$ ), y el retardo entre estas dos ( $\tau$ ).

### 3.1. Ganancia del SOA

En esta sección se van a presentar y discutir los resultados de la caracterización la ganancia y la potencia de salida de dos SOAs-NL comerciales que serán utilizados en los siguientes apartados. Los números de identificación de estos SOAs-NL son 03826 y 03736. Esta caracterización se realiza en función de la potencia de entrada, la intensidad de alimentación del SOA, la longitud de onda y la temperatura en el SOA. Además se va a mostrar y comentar el espectro de emisión del SOA dependiendo de la potencia de la señal de entrada.

El montaje realizado para obtener las medidas de caracterización del SOA es el mostrado y explicado en el Apéndice B.1. Los valores mostrados en las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 no son directamente los obtenidos en el medidor de potencia y en el BOSA sino que se han corregido las pérdidas de las fibras y elementos ópticos situados entre el SOA y estos aparatos de medida. El montaje realizado para obtener el espectro del SOA-NL es el mostrado y explicado en el Apéndice B.2, y los valores mostrados en la Figura 3.4 han sido corregidos de la misma manera que los anteriores.

Los resultados del SOA 03736 son muy similares a los del SOA 03826, por lo que solo se

mostrarán los resultados de uno de los dos SOA. Para la caracterización de la ganancia y de la potencia de salida del SOA se presentan las gráficas producidas usando el SOA 03826 y para el espectro de emisión del SOA se mostrará la gráfica obtenida utilizando el SOA 03736.

La Figura 3.1a muestra la ganancia ( $G$ ) del SOA-NL respecto de la potencia de entrada ( $P_{IN}$ ) en función de la intensidad de alimentación del SOA ( $I_{SOA}$ ). La Figura 3.1b presenta la potencia de salida ( $P_{OUT}$ ) respecto de  $P_{IN}$  en función de  $I_{SOA}$ . Estos datos se han obtenido con el SOA configurado con  $T_{SOA} = 20^\circ C$  y el láser emitiendo a  $\lambda = 1550nm$ .

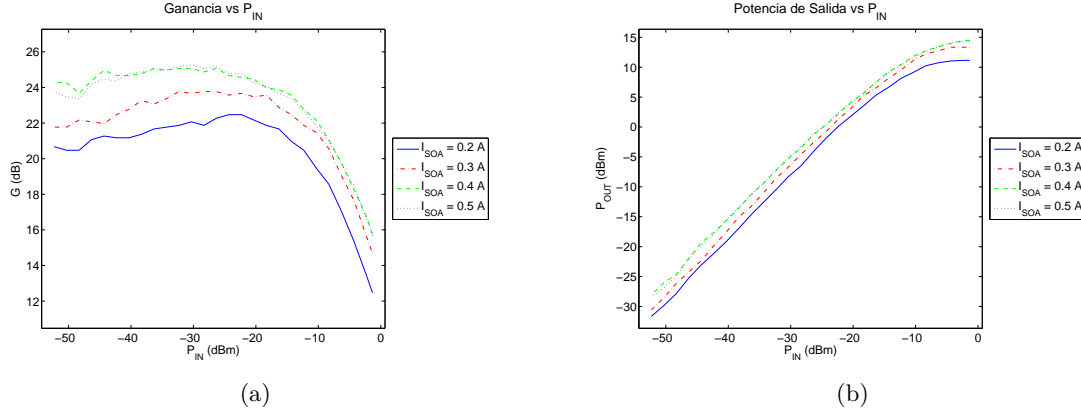


Figura 3.1: Caracterización del SOA-NL respecto de  $I_{SOA}$ : (a) Ganancia del SOA-NL, (b) Potencia de Salida del SOA-NL.

Observando la Figura 3.1a se ve que la ganancia del SOA-NL aumenta conforme se incrementa la  $I_{SOA}$ . La ganancia para una  $I_{SOA} = 0,2A$  toma su máximo en  $P_{IN} = -22,32dBm$ , cuyo valor es  $22,47dB$ . La ganancia del SOA-NL aumenta  $3dB$  cuando  $I_{SOA}$  se incrementa  $0,3A$ . Esto se debe a que al incrementar la  $I_{SOA}$ , aumenta la inyección de portadores en la zona activa. Por ello, hay más pares electrón-hueco disponibles para interactuar con los fotones de la luz en la zona activa, por lo que se incrementa la emisión estimulada y con ello la amplificación de la luz. Esto, tal y como se ve en la Figura 3.1b, incrementa el valor de potencia de salida de saturación de  $11,15dBm$  para  $I_{SOA} = 0,2A$  a  $14,35dBm$  para  $I_{SOA} = 0,5A$ .

En la Figura 3.2a se expone la ganancia ( $G$ ) del SOA-NL a diferentes longitudes de onda ( $\lambda$ ) y en la Figura 3.2b se muestra la  $P_{OUT}$  de ese SOA-NL en función de  $\lambda$ . Para la obtención de estos valores, el SOA-NL se configuró con  $I_{SOA} = 0,2A$  y  $T_{SOA} = 20^\circ C$ .

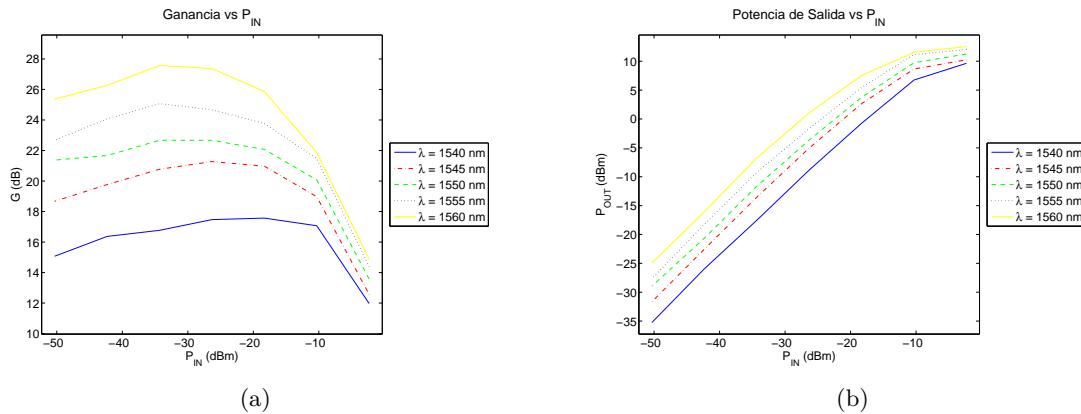


Figura 3.2: Caracterización del SOA-NL respecto de  $\lambda$ : (a) Ganancia del SOA-NL, (b) Potencia de Salida del SOA-NL.

En la Figura 3.2 se puede observar que la ganancia del SOA-NL no es constante para todas las longitudes de onda, sino que varía con la energía del fotón, y se debe a que el medio semiconductor del que está fabricado el SOA-NL depende de la longitud de onda. En la Figura 3.2a se ve que la variación de la ganancia en  $20nm$  es mayor de  $10dB$ . Esta dependencia viene determinada por la probabilidad de que exista un par electrón-hueco disponible para esa energía determinada, la cual varía según el material y la inversión de población que se ha realizado sobre el mismo, y es explicado en más profundidad en el Apéndice A.

La Figura 3.3a se dibuja la ganancia ( $G$ ) del SOA -NL y en la Figura 3.3b su potencia de salida ( $P_{OUT}$ ), las dos en función de la temperatura en el SOA ( $T_{SOA}$ ). Para realizar esta medida, el SOA-NL se configuró con  $I_{SOA} = 0,2A$  y la luz del láser emitía a  $\lambda = 1550nm$ .

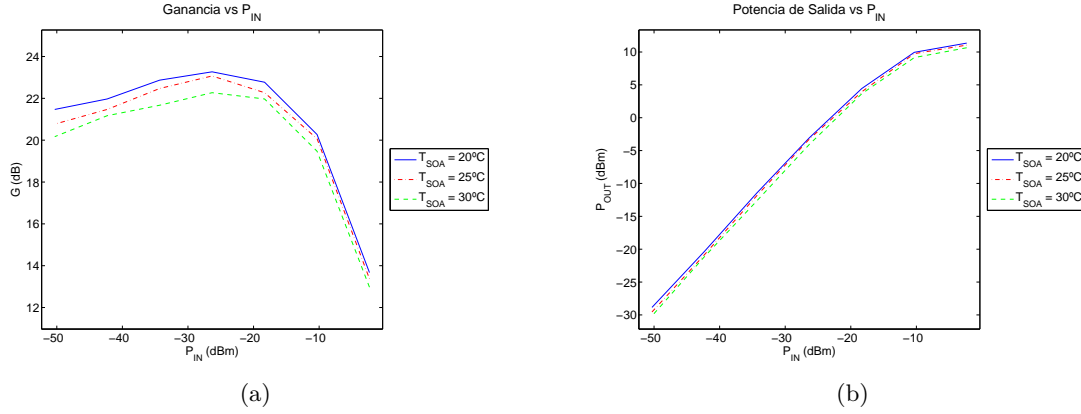


Figura 3.3: Caracterización del SOA-NL respecto de  $T_{SOA}$ : (a) Ganancia del SOA-NL, (b) Potencia de Salida del SOA-NL.

Inspeccionando la Figura 3.3, se ve que la ganancia del SOA-NL es dependiente de la temperatura de operación del SOA ( $T_{SOA}$ ). Como se ve Figura 3.3a, esta dependencia es pequeña, ya que aumentando la temperatura  $10^\circ C$  solo disminuye la ganancia en  $1dB$ . Esta reducción se produce porque al aumentar la temperatura del semiconductor, la probabilidad de las recombinaciones no radiativas aumenta, lo que conlleva que haya menos pares electrón-hueco disponibles para que ocurran recombinaciones radiativas. Tanto las recombinaciones radiativas como las no radiativas han sido explicadas en mas detalle en el Apéndice A.

En las Figuras 3.1a, 3.2a y 3.3a se observa que la ganancia del SOA-NL se mantiene aproximadamente constante para señales de baja potencia, y a partir de una determinada potencia la ganancia empieza a reducirse, lo cual se conoce como saturación de la ganancia del SOA-NL. Esta saturación se debe a que el SOA-NL no es capaz de emitir luz por encima de una determinada potencia y aunque aumente la potencia de entrada este es incapaz de aumentar más la potencia de salida y por tanto se reduce la ganancia del sistema, tal y como se puede ver en las Figuras 3.1b, 3.2b y 3.3b. La saturación se produce porque no hay portadores suficientes en la zona activa para emitir por encima de esa potencia de salida de saturación cuando SOA-NL está alimentado a una determinada  $I_{SOA}$ .

Además en las Figuras 3.1a, 3.2a y 3.3a se aprecia que conforme la potencia de entrada disminuye, la ganancia tiende a reducirse en torno a  $1dB$ . Esto se debe a que la potencia de la señal es muy baja y por lo tanto la emisión espontanea empieza a dominar en la luz emitida, por lo que la potencia útil en la señal de longitud de onda de interés se reduce.

Finalmente, en la Figura 3.4 se muestra el espectro del SOA-NL. Este espectro varía depen-

diendo de la potencia de la luz monocromática a la que es excitado el SOA. Esta luz monocromática es emitida a una longitud de onda ( $\lambda$ ) de  $1550nm$ . Para tomar estos datos, el SOA-NL se configuró con  $I_{SOA} = 0,2A$  y  $T_{SOA} = 20^{\circ}C$ .

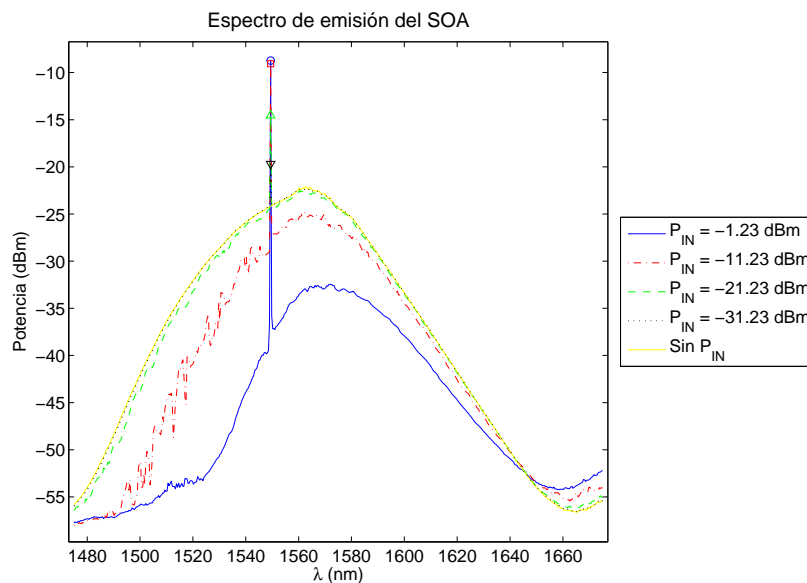


Figura 3.4: Espectro de emisión del SOA-NL en función de  $P_{IN}$ .

La Figura 3.4 muestra que en ausencia de ninguna señal de entrada los pares electrón-hueco se recombinan mediante emisión espontánea emitiendo en un amplio rango de longitudes de onda que van desde  $1450nm$  hasta  $1650nm$ . El máximo de emisión espontánea tiene lugar en  $1562,6nm$ , lo cual está en sintonía con que la ganancia aumente entre  $1540nm$  y  $1560nm$ , tal y como se ve en la Figura 3.2. Además, en la Figura 3.4 también se muestra que cuando una señal, en este caso monocromática, es amplificada, el ruido producido por emisión espontánea se reduce. Esta reducción es mayor conforme la potencia de la señal de entrada se incrementa; y se debe hacer notar que cuando se entra en saturación (línea azul de Figura 3.4) la potencia de salida no aumenta pero el ruido óptico si se reduce. Esta reducción se produce porque los pares electrón-hueco, que son utilizados para amplificar la señal de entrada mediante recombinación estimulada, dejan de estar disponibles para que se recombinen mediante emisión espontánea, lo que reduce el ruido emitido.

## 3.2. No linealidades del SOA

En esta sección se van a mostrar y discutir los resultados de la caracterización de XGM y XPM del SOA-NL. Para la caracterización de XGM se va a mostrar la diferencia entre la potencia del '1' ( $P_1$ ) y la potencia del '0' ( $P_0$ ) en función de la potencia del pump ( $P_{pump}$ ), la diferencia entre la potencia del pump y la potencia del probe ( $P_{pump} - P_{probe}$ ) y el delay entre el pump y el probe ( $\tau$ ). En el caso de la caracterización de XPM se va a mostrar la diferencia de fase entre el tiempo en el que el pump está presente y el que no está presente respecto de la potencia del pump ( $P_{pump}$ ) y de la potencia del probe ( $P_{probe}$ ).

El montaje realizado para obtener las Figuras 3.5 y 3.6 es el mostrado en el Apéndice B.3. Los valores mostrados en estas gráficas, así como los de  $P_{pump}$  y  $P_{probe}$  han sido corregidos para compensar las pérdidas que se producen entre los puntos de medida y el SOA. Para realizar estas medidas el SOA-NL 03736 se ha configurado con  $I_{SOA} = 0,2A$  y  $T_{SOA} = 20^{\circ}C$ , el pump se emite a  $\lambda = 1550,1nm$  y el probe a  $\lambda = 1550,1nm$ . Tanto el pump como el probe se han

modulado en RZ a  $R = 10\text{Gbps}$ .

El montaje utilizado para obtener las Figuras 3.7 y 3.8 es el mostrado en el Apéndice B.4. Los valores de  $P_{\text{pump}}$  y  $P_{\text{probe}}$  se han corregido para compensar las pérdidas que se producen entre el punto de medida y el SOA. Para realizar estas medidas, el SOA se ha configurado con  $I_{\text{SOA}} = 0,2\text{A}$  y  $T_{\text{SOA}} = 20^\circ\text{C}$ , el pump se emite a  $\lambda = 1550,1\text{nm}$  y el probe a  $\lambda = 1550,1\text{nm}$ . El pump y el probe se han modulado con NRZ a  $R = 10\text{Gbps}$ .

En la Figura 3.5 se muestra la diferencia entre  $P_1$  y  $P_0$  causada por XGM en función de  $\tau$  para varios  $P_{\text{pump}}$ . La Figura 3.5a está realizada para  $P_{\text{pump}} - P_{\text{probe}} = 6,24\text{dB}$  y la Figura 3.5b está realizada para  $P_{\text{pump}} - P_{\text{probe}} = 2,27\text{dB}$ .

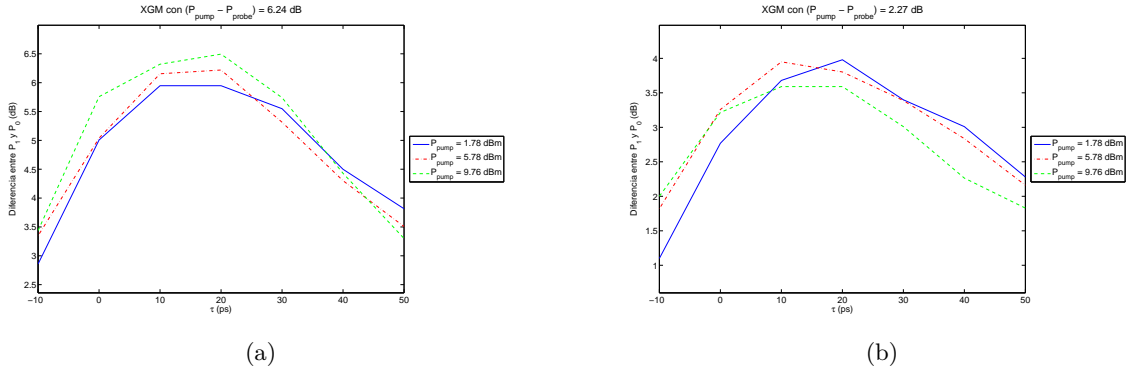


Figura 3.5: Caracterización de XGM del SOA-NL respecto de  $\tau$  y de  $P_{\text{pump}}$ : (a) diferencia entre  $P_{\text{pump}}$  y  $P_{\text{probe}} = 6,24\text{dB}$ , (b) diferencia entre  $P_{\text{pump}}$  y  $P_{\text{probe}} = 2,27\text{dB}$ .

En la Figura 3.6 se presenta la diferencia entre  $P_1$  y  $P_0$  provocada por XGM respecto de  $P_{\text{pump}} - P_{\text{probe}}$  para diferentes  $P_{\text{pump}}$  con  $\tau = 20\text{ps}$ . Además, en la subfigura mostrada en la Figura 3.6 se muestra el diagrama de ojo de XGM del SOA-NL para  $P_{\text{pump}} = 7,76\text{dBm}$ ,  $P_{\text{pump}} - P_{\text{probe}} = 6,26\text{dB}$  y  $\tau = 20\text{ps}$ .

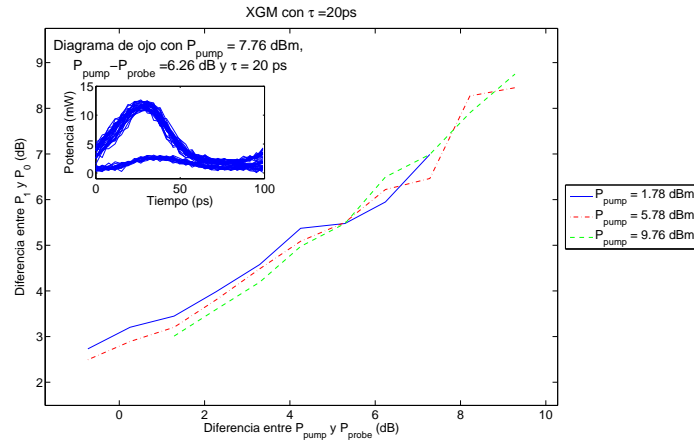


Figura 3.6: Caracterización de XGM del SOA-NL respecto de  $P_{\text{pump}}$  y de la diferencia entre  $P_{\text{pump}}$  y  $P_{\text{probe}}$ .

La señal de salida del SOA, cuando se introduce un probe a  $\lambda_{\text{probe}}$  y un pump a  $\lambda_{\text{pump}}$  modulado con datos, es la inversa de los datos a  $\lambda_{\text{probe}}$ . Tal y como se ha explicado en la sección 2.1.1, esto se debe a que el pump, que tiene más potencia que el probe, deplexiona los portadores y el probe no puede ser amplificado, dando lugar a un cero a la salida. Cuando el pump es un

'0', el probe puede ser amplificado normalmente y por lo tanto es un '1' a la salida.

En la Figura 3.5 se observa que el proceso no lineal de XGM es máximo cuando el pump llega antes que el probe, en concreto unos  $20ps$  antes. Esto se debe a que la llegada previa del pump permite eliminar todos los pares electrón-hueco disponibles en el SOA y así no son utilizados para amplificar el probe. Como el tiempo de recuperación de los portadores del SOA es menor que el de su depleción permite que el probe no sea amplificado durante unos picosegundos después de que el pump haya dejado de llegar al SOA. Esto último también conlleva que la parte final del pulso del probe será amplificada si el pump llega demasiado pronto. De aquí se puede extraer que cuando la tasa de datos es muy alta, la depleción producida por pulso afectará al siguiente pulso de la señal produciendo varios niveles de potencia en el cero y en el uno. Además, también se observa que este efecto ocurre independientemente de la potencia del pump o de la relación de potencia del pump con el probe.

Asimismo, en la subfigura de la Figura 3.6, se observa que el efecto del desfase de las señales en el diagrama de ojo de la señal de salida. Se observa que hay un ligero lóbulo en la parte final de los ceros que es debido a que la ganancia del SOA se empieza a recuperar, pero todavía no es suficientemente grande como para empeorar el beneficio que produce tener el SOA completamente deplecionado cuando llega el pulso del probe. Para conseguir la operación óptima de XGM hay que tener en cuenta el compromiso que produce la aparición del lobulo por el comienzo de la recuperación del SOA con la aparición del mismo por que el SOA no este completamente deplecionado.

En la Figura 3.6 se observa que la eficiencia del XGM depende únicamente de la relación de potencia entre el pump y probe y no de las potencias concretas de los mismos. El reparto de los portadores entre la amplificación de las dos señales será el mismo siempre y cuando éstas mantengan la misma relación entre la potencia de las señales y el sistema se encuentre en saturación, por lo que el efecto de la compresión de la ganancia será el mismo cuando la relación entre las potencias sea la misma.

En la Figura 3.7 se presenta la diferencia de fase provocada por XPM en función del  $P_{pump}$  para varios  $P_{probe}$ .

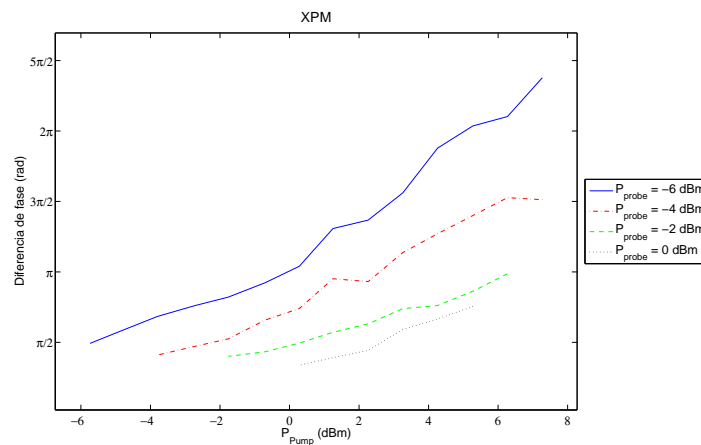


Figura 3.7: Caracterización de XPM del SOA-NL respecto de  $P_{pump}$  y  $P_{probe}$ .

Como se ha explicado en el apartado 2.1.2, cuando el pump entra en el SOA produce un cambio en los portadores del SOA y esto provoca un cambio en el índice de refracción del medio. Este cambio en el índice de refracción del SOA provoca un cambio en la fase de la luz del probe.

En la Figura 3.7 se observa que el aumento de la potencia del pump lleva asociado un aumento del desfase producido en el probe. Esto se debe a que conforme aumentamos la potencia del pump, el número de portadores que utiliza el SOA para amplificarlo son mayores y el cambio del índice de refracción es mayor. Estos cambios mayores en el índice de refracción conllevan un mayor desfase en el probe respecto de cuando el pump no está presente. Cuando aumentamos el probe de potencia es necesario aumentar el pump para conseguir el mismo desfase, ya que un mayor número de portadores son utilizados en la amplificación del probe y el pump tiene menos margen para modificar el índice de refracción.

En la Figura 3.8 se presenta la forma de onda de XPM (fase de la señal de salida) y la forma de onda de XGM (amplitud de la señal de salida) obtenidas en el BOSA. La Figura 3.8 se ha realizado utilizando  $P_{pump} = 2,67dBm$  y  $P_{probe} = -3,98dBm$  como señales de entrada.

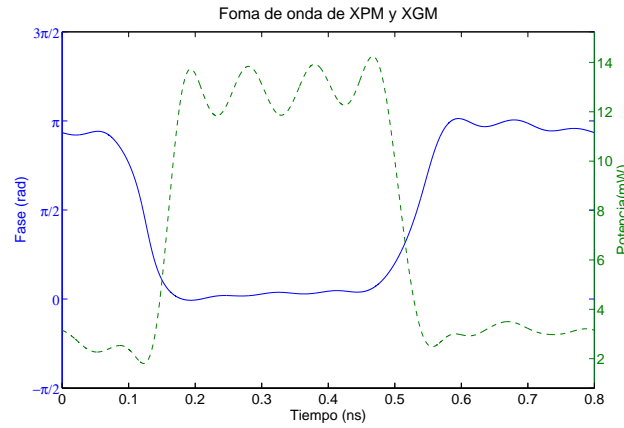


Figura 3.8: Forma de onda del XPM y XGM para  $P_{pump} = 2,67dBm$  y  $P_{probe} = -3,98dBm$ .

En la Figura 3.8 se observa que el proceso de XGM y el proceso de XPM están ligados, es decir, que cuando se produce uno de ellos también ocurre el otro. Esto se debe a que los dos se basan en la reducción de los portadores del SOA mediante un pump y que esta reducción provoque cambios en un probe, bien sea una reducción de su amplitud (XGM) o una cambio en su fase (XPM).





## Capítulo 4

# Conversor de Longitud de Onda

En este apartado se va a diseñar un conversor de longitud de onda con dos salidas, una inversa y otra no inversa, a la misma longitud de onda. Además, se va a realizar la simulación del sistema para observar el comportamiento del mismo y se va a montar con elementos discretos como primera aproximación al sistema. Por último, se va a realizar el diseño del circuito integrado, aunque no se va a testear el sistema óptico integrado debido a que el tiempo de fabricación y posterior testeo es demasiado largo para realizarlo en un Proyecto Fin de Carrera.

### 4.1. Concepto

El conversor de longitud de onda se basa en un SOA-MZI simétrico. La entrada del probe del SOA-MZI es un acoplador 50-50, así como la salida del SOA-MZI. Estos acopladores introducen un desfase de  $\pi/2$  a la salida acoplada, mientras que no introducen desfase a la salida directa. Como entrada de pump es necesario colocar un divisor Y en uno de los brazos para que esta señal pueda ser introducida de forma independiente a uno de los SOA sin introducir ningún tipo de desfase en las señales al pasar por él. Para mantener el sistema simétrico hay que introducir otro divisor Y en el otro brazo o un atenuador de 3dB. Este diseño se muestra en la Figura 4.1.

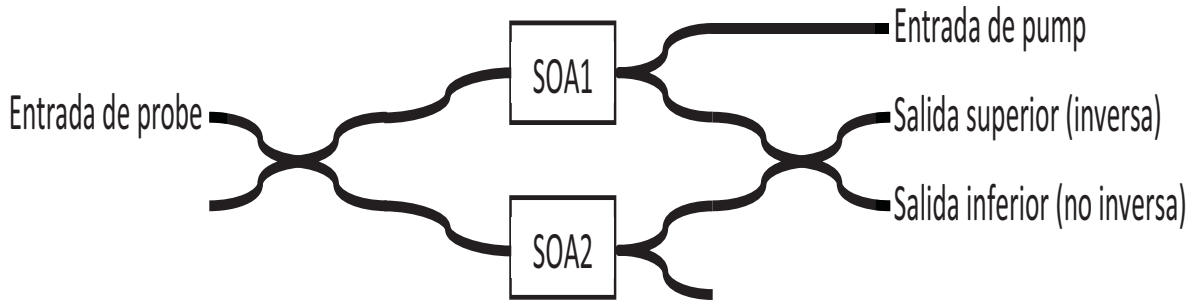


Figura 4.1: Esquemático del conversor de longitud de onda con dos salidas, inversa y no inversa.

La inyección del pump se realiza en contrapropagante para que la eliminación del pump no requiera filtrar la salida obligatoriamente. Aunque este filtrado no sea necesario es recomendable filtrar las señales de salida, ya que así se elimina el ruido generado por los SOAs.

Las salidas de este sistema siguen la ecuación 2.4, pero teniendo en cuenta la ganancia y desfase introducido por los SOAs y el desfase introducido por los acopladores 50-50. Por lo que las salidas del conversor de longitud de onda siguen las siguientes ecuaciones:

$$P_{superior} = P_{IN}(G_1 + G_2 + 2\sqrt{G_1 G_2} \cos(\phi_{xPM})) \quad (4.1)$$

$$P_{inferior} = P_{IN}(G_1 + G_2 + 2\sqrt{G_1 G_2} \cos(\phi_{XPM} + \pi)) \quad (4.2)$$

donde  $P_{IN}$  es la potencia del probe que entra a cada SOA, es decir  $P_{probe}/2$ ,  $G_1$  es la ganancia del SOA1,  $G_2$  es la ganancia del SOA2 y  $\phi_{XPM}$  es el desfase que se produce entre los dos SOAs.

Analizando estas salidas para los dos estados posibles del pump, podemos ver cómo se comportan estas salidas. Si  $P_{pump} = P_1$  se produce una compresión de la ganancia en el SOA1 y por tanto  $G_1 = G_{11}$ , que es la ganancia del SOA para el probe en presencia del nivel alto del pump y XPM en la señal  $\phi_{XPM} = \pi$ .

$$P_{superior1} = P_{IN}(G_{11} + G_2 - 2\sqrt{G_{11} G_2}) \quad (4.3)$$

$$P_{inferior1} = P_{IN}(G_{11} + G_2 + 2\sqrt{G_{11} G_2}) \quad (4.4)$$

Si el  $P_{pump} = P_0$  casi no se produce una compresión de la ganancia en el SOA1 y por tanto  $G_1 = G_{10}$ , que es la ganancia del SOA para el probe en presencia del nivel bajo del pump la cual es aproximadamente igual a  $G_2$  y XPM en la señal  $\phi_{XPM} = 0$ .

$$P_{superior0} = P_{IN}(G_{10} + G_2 + 2\sqrt{G_{10} G_2}) \approx 4P_{IN}G_2 \quad (4.5)$$

$$P_{inferior0} = P_{IN}(G_{10} + G_2 - 2\sqrt{G_{10} G_2}) \approx 0 \quad (4.6)$$

Observando las ecuaciones 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 se ve que en la salida superior se obtiene la salida inversa del pump y en la salida inferior se obtiene la salida no inversa del pump. El peor caso es cuando la XGM en el SOA es máximo y por tanto  $G_{11} = 0$ . En este caso las salidas tendrán el menor recorrido posible, entre  $P_{IN}G_2$  y  $4P_{IN}G_2$  para la salida inversa y entre 0 y  $P_{IN}G_2$  y el nivel del uno de la salida inversa es igual que el nivel del cero de la salida no inversa ( $P_{IN}G_2$ ).

Por lo tanto, se debe elegir la relación entre el pump y el probe que produzca el desfase de  $\pi$  entre los dos brazos pero que produzca la menor compresión de ganancia por XGM en el brazo donde se introduce el pump.

## 4.2. Simulaciones

En esta sección se van a presentar las simulaciones del sistema presentado en la sección 4.1. Para realizar esta simulación se ha utilizado el programa de simulación de dispositivos ópticos VPI. El sistema simulado para la modulación RZ es el mostrado en la Figura 4.2 y es explicado con más profundidad en el Apéndice B.5, mientras que el sistema simulado para la modulación NRZ es el que se muestra en la Figura 4.3 y es comentado con más detalle en el Apéndice B.6. Después de realizar las simulaciones con VPI, los datos han sido procesados con Matlab para obtener las curvas de BER (Figuras 4.4 y 4.6) y los diagramas de ojo (Figuras 4.5 y 4.7).

En la Figura 4.2 se muestra el montaje utilizado para la simulación del conversor de longitud de onda con modulación RZ.

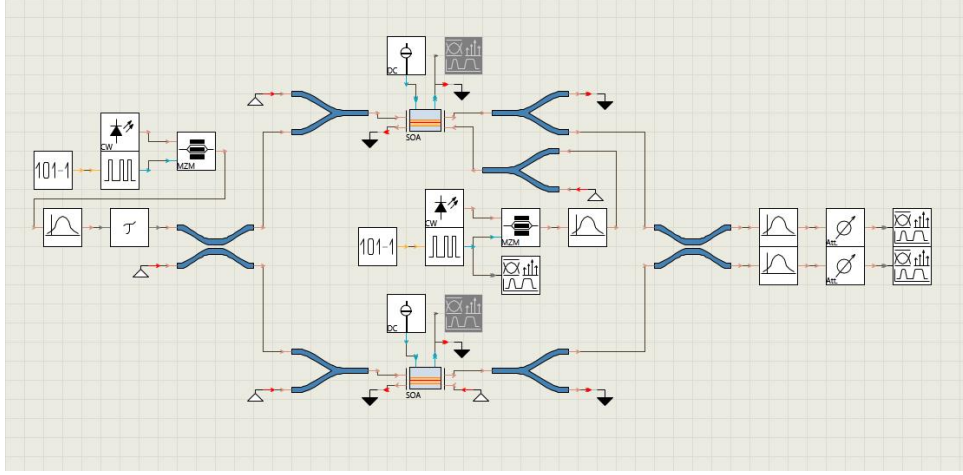


Figura 4.2: Montaje para la simulación del conversor de longitud de onda con modulación RZ.

En la Figura 4.3 se muestra el montaje utilizado para la simulación del conversor de longitud de onda con modulación NRZ.

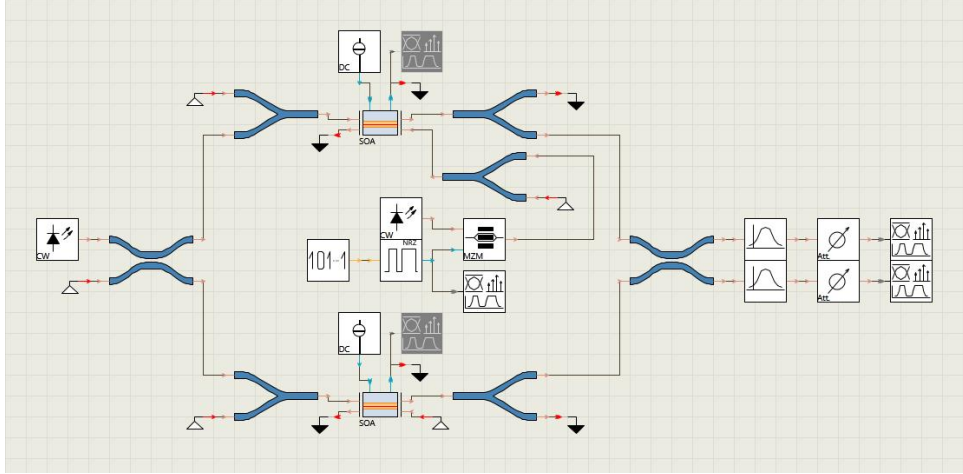


Figura 4.3: Montaje para la simulación del conversor de longitud de onda con modulación NRZ.

En las Figuras 4.4 y 4.5 se muestran los resultados del sistema óptimo para la modulación RZ a diferentes tasas de datos ( $R$ ). Para el sistema a  $R = 10\text{Gbps}$  se ha utilizado la siguiente configuración:  $P_{probe} = -6\text{dBm}$  a  $\lambda = 1546,3\text{nm}$ ,  $P_{pump} = 0\text{dBm}$  a  $\lambda = 1557,8\text{nm}$ ,  $\tau = 25\text{ps}$  y  $I_{SOA} = 0,2\text{A}$ . Para el sistema a  $R = 20\text{Gbps}$  la configuración usada es:  $P_{probe} = -6\text{dBm}$  a  $\lambda = 1546,3\text{nm}$ ,  $P_{pump} = 0\text{dBm}$  a  $\lambda = 1557,8\text{nm}$ ,  $\tau = 20\text{ps}$  y  $I_{SOA} = 0,4\text{A}$ . Para el sistema a  $R = 40\text{Gbps}$  se utilizaron los siguientes parámetros  $P_{probe} = -6\text{dBm}$  a  $\lambda = 1546,3\text{nm}$ ,  $P_{pump} = 0\text{dBm}$  a  $\lambda = 1557,8\text{nm}$ ,  $\tau = 12,5\text{ps}$  y  $I_{SOA} = 0,4\text{A}$ .

Las simulaciones realizadas con VPI nos permiten decir que las longitudes de onda elegidas así como la relación entre ellas no influyen en el comportamiento del sistema. Por tanto, aunque las longitudes de onda utilizadas en la simulación de las Figuras 4.4 y 4.5, y las utilizadas en los montajes experimentales de caracterización y de prueba del concepto no coincidan, no afecta al resultado del experimento.

Tomando los datos de la Figura 3.7, se simulaban tres casos para distintas potencias de pump y probe en las que se obtenía un desfase de  $\pi$  ( $P_{probe} = -6\text{dBm}$  y  $P_{pump} = 0\text{dBm}$ ,  $P_{probe} = -4\text{dBm}$  y  $P_{pump} = 2\text{dBm}$ , y  $P_{probe} = -2\text{dBm}$  y  $P_{pump} = 6\text{dBm}$ ). Se observó que

conforme aumentaban las potencias, el comportamiento del sistema empeoraba, especialmente en el caso de la salida no inversa. En el caso de  $P_{probe} = -4dBm$  y  $P_{pump} = 2dBm$  el empeoramiento no era muy grande, lo cual se debe a que no se conseguía perfectamente el desfase de  $\pi$ ; mientras que en el caso de  $P_{probe} = -2dBm$  y  $P_{pump} = 6dBm$  el empeoramiento era mayor, ya que se producía una mayor XGM al ser mayor la diferencia entre el pump y el probe. Por tanto, se ha seleccionado la  $P_{probe} = -6dBm$  y  $P_{pump} = 0dBm$  como potencias de entrada al sistema.

Después de ello se realizaron las simulaciones para diferentes desfases entre el pump y el probe, porque la modulación del sistema es RZ. Estas simulaciones nos dan unos resultados similares a los mostrados en la Figura 3.5 y revela que el delay óptimo del sistema es  $\tau = 25ps$  para  $R = 10Gbps$ . Esto tiene sentido, ya que si el pulso del pump llega a la vez o un poco antes que el pulso del probe ( $\tau < 25ps$ ), la depleción de los portadores no se ha producido completamente, mientras que si llega demasiado pronto ( $\tau > 25ps$ ) la recuperación de los portadores comienza antes de que acabe el pulso del probe y por lo tanto se distorsionará la forma del pulso. Para el caso de  $R = 20Gbps$  el  $\tau$  óptimo es de  $20ps$  y para el caso de  $R = 40Gbps$  el  $\tau$  óptimo es de  $12,5ps$ .

También se han realizado simulaciones para diferentes intensidades del SOA ( $I_{SOA} = 0,2A$ ,  $I_{SOA} = 0,3A$  y  $I_{SOA} = 0,4A$ ), con los parámetros fijados anteriormente. Para  $R = 10Gbps$  se observa que conforme aumenta la intensidad la respuesta del sistema empeora, especialmente en el caso de la salida inversa. Esto se debe a que cambia el número de portadores en el medio, lo que cambia la dinámica de XGM y XPM, y por ello se selecciona  $I_{SOA} = 0,2A$ . Para la  $R = 20Gbps$  y  $R = 40Gbps$  se ha seleccionado  $I_{SOA} = 0,4A$  ya que los resultados mejoran conforme aumentábamos la intensidad del SOA y no se probó a intensidades mayores, ya que los SOAs comerciales estarían cerca de dañarse y los integrados no la podrían soportar. Esta mejora se debe a que el aumento de portadores hace que la XGM y la XPM se adapten mejor a estas tasas de modulación y por lo tanto a los requisitos del sistema.

Además, se probaron varias configuraciones de inyección del pump a uno de los SOAs (copropagante, contrapropagante y las dos simultáneamente). En estos casos se observó que la señal inversa no se veía casi afectada por los cambios de configuración pero la salida no inversa empeoraba ligeramente para la configuración simultánea y empeoraba notablemente para el caso del esquema copropagante. Por lo tanto, se ha seleccionado el esquema contrapropagante para el sistema, ya que es el que mejor se comporta para las dos salidas.

En la Figura 4.4 se presenta el BER simulado del sistema para las tres tasas de datos, tanto para la salida no inversa (4.4a) como para la salida inversa (4.4b), con modulación RZ.

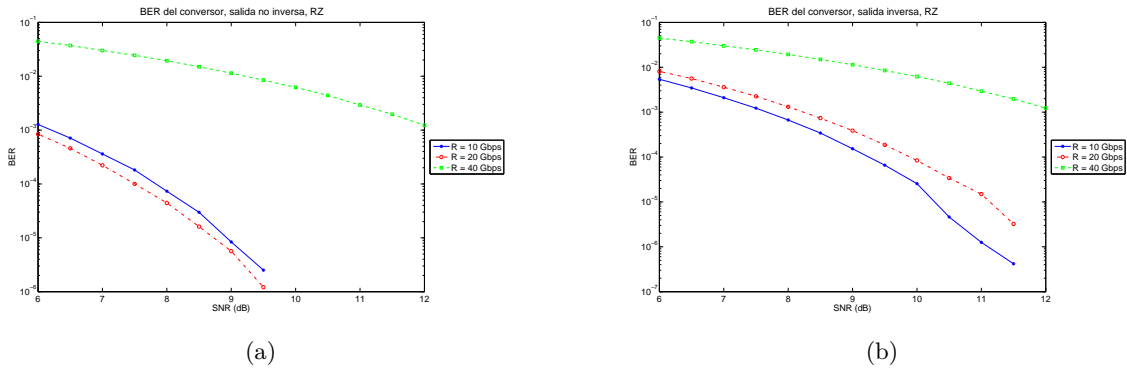


Figura 4.4: Simulación del BER del conversor de longitud de onda para modulación RZ en función de la tasa de datos del pump: (a) Salida no inversa, (b) Salida inversa

En la Figura 4.5 se presentan los diagramas de ojo sin ruido de la señal inversa (4.5a, 4.5b y 4.5c) y de la no inversa (4.5d, 4.5e y 4.5f) para las tres tasas de datos con modulación RZ.

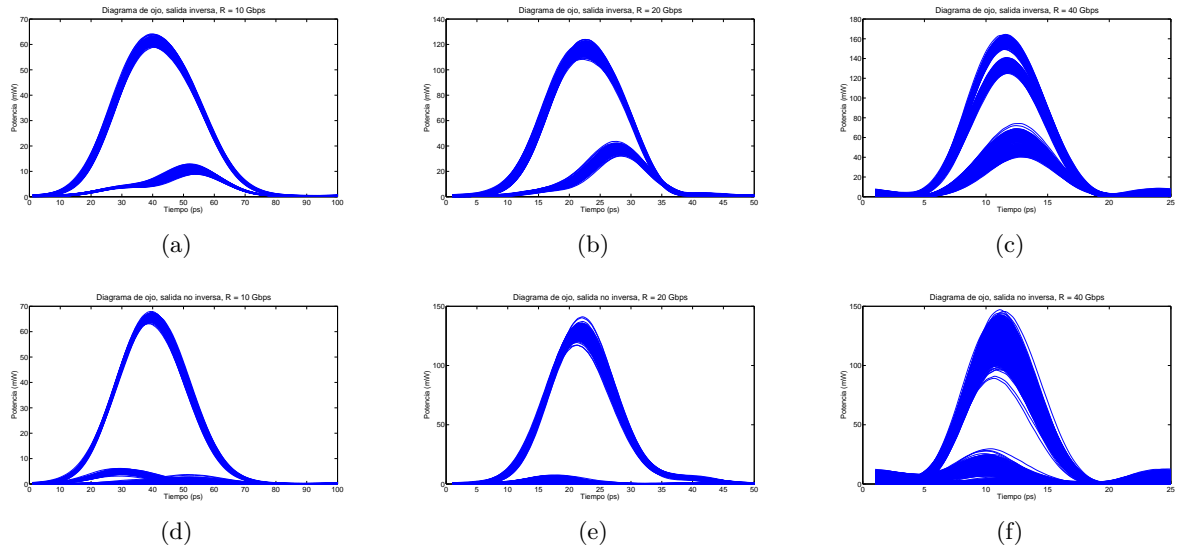


Figura 4.5: Diagramas de ojo del convertor de longitud de onda con modulación RZ: (a) Salida inversa a  $R = 10\text{Gbps}$ , (b) Salida inversa a  $R = 20\text{Gbps}$ , (c) Salida inversa a  $R = 40\text{Gbps}$ , (d) Salida no inversa a  $R = 10\text{Gbps}$ , (e) Salida no inversa a  $R = 20\text{Gbps}$ , (f) Salida no inversa a  $R = 40\text{Gbps}$ .

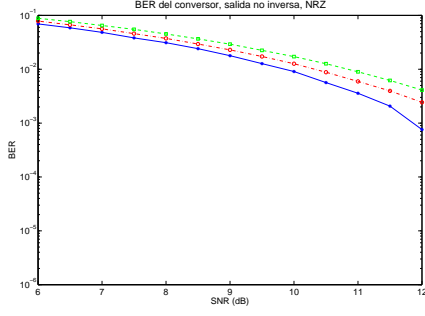
En la Figura 4.4 se muestra que el sistema funciona correctamente para tasas de datos de  $R = 10\text{Gbps}$  y  $R = 20\text{Gbps}$  con modulación RZ. En el caso de  $R = 40\text{Gbps}$  la tasa de error es realmente mala, ya que la dinámica del SOA-MZI no es capaz de seguir tasas tan altas sin modificaciones significativas en el esquema. Este comportamiento se observa también en la Figura 4.5, ya que se ve que el diagrama de ojo de la señal inversa está más abierto para  $R = 10\text{Gbps}$  y para la señal no inversa la apertura máxima del ojo se consigue para  $R = 20\text{Gbps}$ . En el caso de  $R = 40\text{Gbps}$  se observa que el ojo se cierra considerablemente y da un peor resultado de BER.

En la Figura 4.4 se observa que la salida inversa tiene un peor BER que la no inversa, lo cual es confirmado observando los diagramas de ojo de la Figura 4.5.

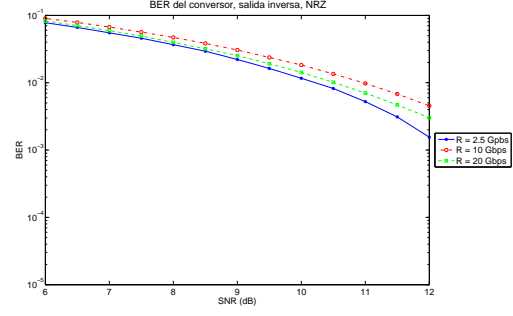
Por otro lado, el convertor de longitud de onda también se ha simulado para modulación NRZ. Aunque el sistema se ha diseñado para trabajar en RZ, también se ha simulado en NRZ ya que el montaje experimental solo se ha podido realizar en el NRZ, tal y como se explica en la sección 4.3.

La simulación del convertor de longitud de onda para modulación NRZ se ha simulado para tres tasas de datos:  $R = 2,5\text{Gbps}$ ,  $R = 10\text{Gbps}$  y  $R = 20\text{Gbps}$ . Las dos primeras han sido obtenidas en el sistema experimental, mientras que en la última se ha simulado para observar cómo funcionaría el sistema a tasas más altas. Para  $R = 2,5\text{Gbps}$  y  $R = 10\text{Gbps}$  los parámetros utilizados son:  $P_{probe} = -6\text{dBm}$  a  $\lambda = 1546,3\text{nm}$ ,  $P_{pump} = 0\text{dBm}$  a  $\lambda = 1557,8\text{nm}$  y  $I_{SOA} = 0,2\text{A}$ . Mientras que para  $R = 20\text{Gbps}$  la configuración es:  $P_{probe} = -6\text{dBm}$  a  $\lambda = 1546,3\text{nm}$ ,  $P_{pump} = 0\text{dBm}$  a  $\lambda = 1557,8\text{nm}$  y  $I_{SOA} = 0,4\text{A}$ . Estos parámetros son los mismos que los utilizados en la modulación RZ, aunque en este caso no tiene sentido de hablar del delay entre las señales ya que el probe es una señal continua.

En la Figura 4.4 se muestra el BER simulado del sistema para las tres tasas de datos, tanto para la salida no inversa (4.4a) como para la salida inversa (4.4b), con modulación NRZ.



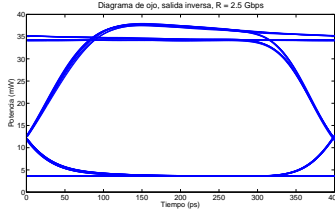
(a)



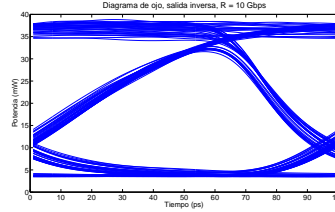
(b)

Figura 4.6: Simulación del BER del convertor de longitud de onda para modulación NRZ en función de la tasa de datos del pump: (a) Salida no inversa, (b) Salida inversa

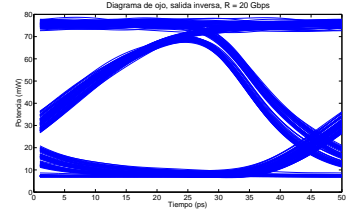
En la Figura 4.5 se enseñan los diagramas de ojo sin ruido de la señal inversa (4.5a, 4.5b y 4.5c) y de la no inversa (4.5d, 4.5e y 4.5f) para las tres tasas de datos, con modulación NRZ.



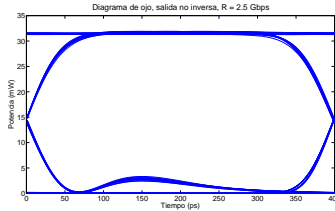
(a)



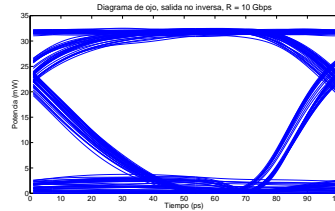
(b)



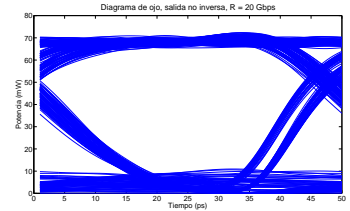
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.7: Diagramas de ojo del convertor de longitud de onda con modulación NRZ: (a) Salida inversa a  $R = 2,5Gbps$ , (b) Salida inversa a  $R = 10Gbps$ , (c) Salida inversa a  $R = 20Gbps$ , (d) Salida no inversa a  $R = 2,5Gbps$ , (e) Salida no inversa a  $R = 10Gbps$ , (f) Salida no inversa a  $R = 20Gbps$ .

En las Figuras 4.6 y 4.7 se puede observar que el sistema empeora notablemente cuando se utiliza la modulación NRZ, ya que los efectos asociados al tiempo de recuperación de la ganancia afectan a los bits siguientes. Esta distorsión provoca el diagrama de ojo se cierre, tanto por la mayor dispersión en los niveles de potencia como por el jitter o variabilidad temporal de las transiciones entre los dos niveles, y por tanto que el BER empeore.

Para que el sistema funcione correctamente a tasas de datos muy altas o con modulación NRZ habrá que buscar modificaciones a este esquema, como realizar un filtrado desplazado hacia el azul a la salida del sistema, estudiar el efecto de provocar asimetrías entre los brazos del SOA-MZI o estudiar el efecto de utilizar sistemas encadenados a este que permitan mejorar el comportamiento de este sistema.

### 4.3. Resultados Experimentales

En esta sección se van a presentar el resultado de la prueba de concepto del convertor de longitud de onda. Para realizar esta prueba se ha realizado el montaje mostrado en la Figura 4.8, el cual es explicado a fondo en el Apéndice B.7. Además, la Figura 4.9, muestra una fotografía del montaje en el laboratorio.

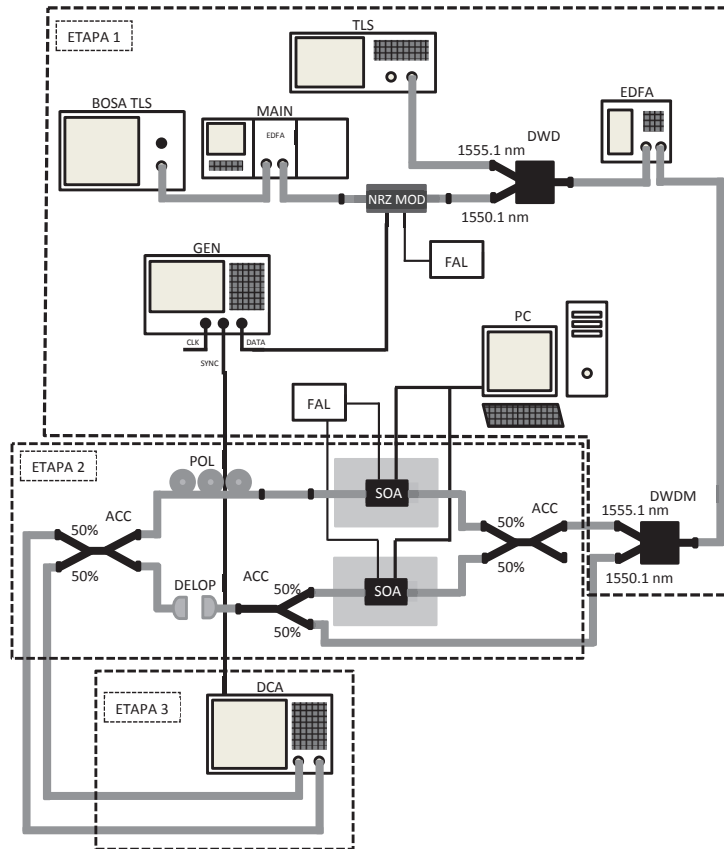


Figura 4.8: Montaje para realizar la prueba de concepto del convertor de longitud de onda.



Figura 4.9: Fotografía del montaje utilizado en la prueba de concepto del convertor de longitud de onda.



Las Figuras 4.10b y 4.11b se han obtenido gracias al montaje mostrado en las Figuras 4.8 y 4.9, y explicado en el Apéndice B.7. Mientras que las Figuras 4.10a y 4.11a se han conseguido mediante el esquema de simulación explicado en el Apéndice B.6.

En la Figura 4.10 se muestran las salidas inversa y no inversa, tanto simuladas como experimentales, del conversor de longitud de onda modulado en NRZ a tasas de datos  $R = 2,5Gbps$  para  $P_{probe} = -6dBm$  y  $P_{pump} = 0dBm$ .

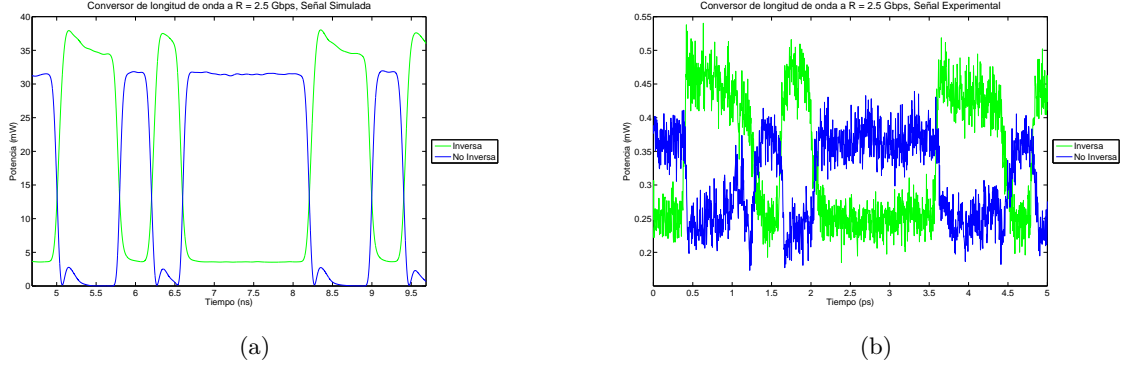


Figura 4.10: Salidas (inversa y no inversa) del conversor de longitud de onda a  $R = 2,5Gbps$  para  $P_{pump} = 0dBm$  y  $P_{probe} = -6dBm$ : (a) Simulación, (b) Experimental.

En la Figura 4.11 se enseñan las salidas inversa y no inversa del conversor de longitud de onda en simulación y en medida experimental. Este conversor de longitud de onda se ha modulado en NRZ con una tasa de datos  $R = 2,5Gbps$  para  $P_{probe} = -6dBm$  y  $P_{pump} = 0dBm$ .

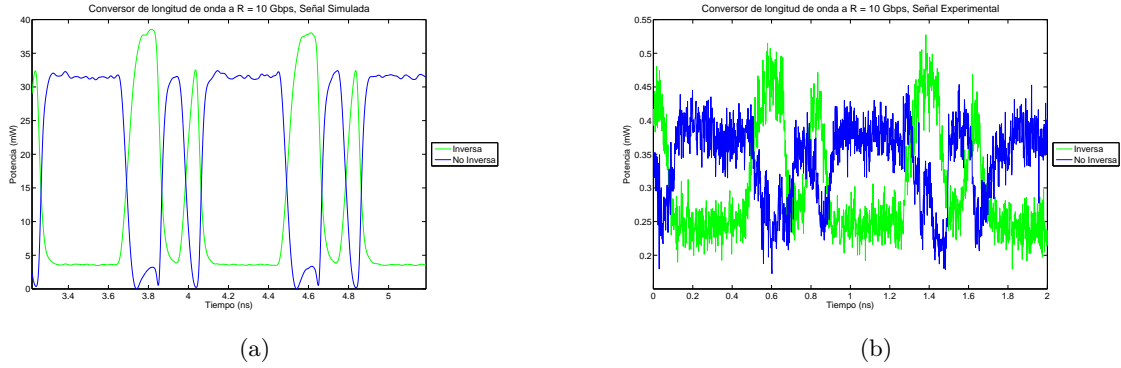


Figura 4.11: Salidas (inversa y no inversa) del conversor de longitud de onda a  $R = 10Gbps$  para  $P_{pump} = 0dBm$  y  $P_{probe} = -6dBm$ : (a) Simulación, (b) Experimental.

El sistema interferómetro montado mediante elementos discretos y fibras es altamente inestable. Esto se debe a que hay que conseguir que los dos brazos del interferómetro tengan la misma longitud o que al menos su diferencia sea menor que la distancia de coherencia ( $L_c$ ) de la fuente. Además, las señales de los dos brazos deben interferir con la misma polarización.

Al montar el sistema con elementos discretos es extremadamente difícil conseguir que la diferencia entre la longitud de los dos brazos este dentro de la longitud de coherencia, ya que el sistema montado mediante fibras y elementos discretos mide varios metros. Además, cualquier leve movimiento en las fibras de los brazos modificará la polarización, produciendo un desajuste en la polarización de la señal que puede llevar a eliminar la interferencia de las ondas. Esto ya



se mostró en la ecuación 2.4. Asimismo, en un sistema con una longitud de varios metros los cambios en la temperatura de las fibras no son uniformes y estos pueden provocar cambios de fase no controlados en las señales que viajan por los brazos del interferómetro, lo que provocaría que aumente la inestabilidad del sistema.

El test experimental se ha realizado en modulación NRZ en lugar de RZ, ya que el ancho de banda de la modulación RZ es mayor y por lo tanto la  $L_c$  es menor. Como  $L_c$  es menor es más difícil ajustar correctamente los dos brazos en el diseño discreto y no se puede conseguir que el sistema discreto funcione correctamente con modulación RZ. Esta es la misma razón por la que no se han realizado test a velocidades superiores, aunque se puede esperar que en sistema óptico integrado funcionen.

Observando las Figuras 4.10 y 4.11 se puede ver que el sistema está produciendo las dos salidas, tanto la inversa como la no inversa. En las Figuras 4.10 y 4.11 se ve la influencia de la XGM en la interferencia, ya que desbalancea la potencia de los dos brazos y por tanto la interferencia que se produce no es la ideal, sino que se varían los valores de cero y uno de las señales de salida, tal y como se explica en la sección 4.1. Además, se puede observar que el nivel de cero es bastante alto tanto en la señal inversa como en la señal no inversa. Como esto ocurre en las dos salidas, se debe a que la interferencia que se produce en el sistema no es ideal debido a que la polarización de las señales de los dos brazos no es exactamente la misma y por tanto habrá términos en los que no se produzca interferencia. Además, estas dos salidas no han sido filtradas por lo que el ASE producido en los dos SOA se suma sin interferir, y aunque por el régimen de trabajo del SOA este ruido no es muy grande introduce un offset en las señales de salida.

Además, comparando las Figuras 4.10a y 4.11a con las Figuras 4.10b y 4.11b se observa que las señales producidas en el sistema experimental tienen un comportamiento muy similar que las señales simuladas. Esto nos permite confirmar que las simulaciones realizadas en la sección 4.2 son una buena aproximación al sistema, además de que el sistema realiza la funcionalidad deseada.

## 4.4. Diseño Integrado

En esta sección se va a presentar el diseño del dispositivo integrado en la plataforma de integración óptica JePPIX del Instituto COBRA de la Universidad Técnica de Eindhoven (TUE).

Este diseño se realiza en InP ya que es un material que permite diseñar dispositivos con zonas activas. Por lo tanto, se pueden combinar zonas activas con elementos pasivos para realizar el conversor de longitud de onda basado en un SOA-MZI. En el Apéndice C.1 se muestra la disposición de capas de la oblea de integración, tanto para zonas activas como para zonas pasivas, y la celda de la oblea en la que se ha realizado el diseño.

El esquema mostrado en la Figura 4.12 esta compuesto de 2 SOAs y 6 Interferómetros Multi-modo 2X2 (MMI2X2). Los SOAs tiene una longitud de  $500 \mu m$  y su zona activa esta compuesta de cuatro QW. Los MMI2X2 actúan como acopladores 50-50 ya que la señal directa de salida no tiene desfase y la señal acoplada de salida tiene un desfase de  $\pi/2$ . Cada salida de los SOAs esta conectada a un MMI2X2 para dar la suficiente versatilidad al sistema y poder inyectar señales de forma independiente a cada SOA, tanto en copropagante como en contrapropagante. Aunque en el diseño realizado solo hace falta tener acceso a uno de los dos SOAs en esquema contrapropagante, el diseño integrado del SOA-MZI se ha realizado con esta versatilidad para que pueda ser utilizado en otros proyectos de investigación y para permitir que se puedan testear posibles mejoras del sistema. Finalmente, las salidas que pasan a través de los MMI2X2 sin que

se modifique su fase son acopladas mediante otros dos MMI2X2 para obtener así el SOA-MZI en el que está basado el conversor de longitud de onda de dos salidas.

En la Figura 4.12 se puede observar el diseño del SOA-MZI que se usará como conversor de longitud de onda.

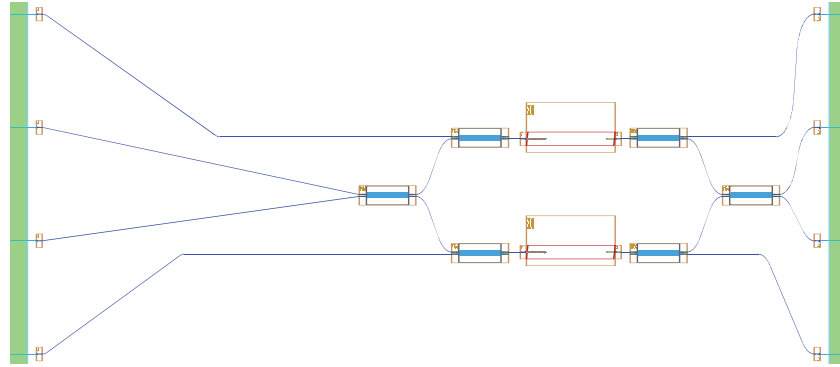


Figura 4.12: Diseño del sistema integrado.

Con la integración del sistema se resolverán los problemas de polarización y de coherencia que se han comentado en el apartado 4.3. Por un lado, el problema de polarización se resuelve debido a que las guías ópticas que se utilizan en óptica integrada impiden los cambios o rotaciones de la polarización de la luz que viaja a través de ellas. Por otro lado, el problema de que la coherencia se resuelve gracias a que el diseño en chips ópticos permite ajustar las distancias en el orden de nanómetros, por lo que los dos brazos del SOA-MZI serán exactamente iguales, es decir, la interferencia se producirá dentro de la longitud de coherencia.

Desafortunadamente, esta plataforma de integración fotónica no tiene filtros ópticos todavía, por lo que las señales no podrán ser filtradas dentro del chip para eliminar el ASE producido por los SOAs. Para eliminar este ruido se deberá realizar el filtrado fuera del chip.

## Capítulo 5

# Conclusión

Este proyecto forma parte del proyecto PEGASO (Matrices de puertas lógicas basadas en amplificadores ópticos de semiconductor) del Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF) del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A).

El objetivo ha sido diseñar un conversor de longitud de onda que produzca dos señales de salida a la misma longitud de onda, teniendo en una los mismos datos que la señal a convertir pero en la longitud de onda deseada y en la otra los datos inversos a esta.

En el proyecto PEGASO es necesario generar la inversa de las cuatro señales de entrada para poder realizar de forma completa la LUT del sistema, por lo que era necesario colocar inversores a la entrada del sistema. Además, la interconexión del sistema quedaba limitada por las longitudes de onda que producían los sistemas previos, ya que cada entrada debía tener una longitud de onda distinta a las que se utilizaban dentro del sistema. Por lo que era necesario utilizar nueve longitudes de onda, de las cuales cuatro correspondían a las entradas, otras cuatro a los inversores y una más para las NOR que sirven para obtener las posibles combinaciones de salida. Utilizando este tipo de conversores el sistema se pueden reducir las longitudes de ondas usadas a cinco, cuatro para los cuatro conversores y una más para las entradas que puede ser reutilizada en las NOR, y así convertir al sistema independiente de donde provengan las entradas.

En primer lugar, se ha consultado distinta bibliografía sobre dispositivos basados en SOA y las configuraciones en los que son utilizados, concluyendo la viabilidad de realizar el conversor de longitud de onda mediante un SOA-MZI simétrico con un esquema de inyección de la señal moduladora contrapropagante.

En segundo lugar, se ha efectuado la caracterización lineal y no lineal de un SOA. La caracterización lineal del sistema permite conocer el funcionamiento básico del SOA obteniendo las curvas de ganancia y de  $P_{out}$ , así como el espectro de emisión del SOA en función de  $P_{in}$ . La caracterización no lineal del SOA ha consistido en estudiar XGM y XPM en función de la potencia de las señales que la producen, y en el caso de XGM también entre la relación temporal de las mismas. Gracias a esta caracterización se han podido aproximar los parámetros de diseño utilizados en la simulación del sistema y posterior prueba.

Por último, se ha realizado la simulación del sistema mediante un programa de simulación óptica (VPI) con el objetivo ajustar los parámetros del sistema. Después de ello se ha montado con elementos ópticos discretos en el laboratorio como primer paso para demostrar su viabilidad como conversor de longitud de onda e inversor en el proyecto PEGASO. Tanto en la simulación como en el montaje con elementos discretos se ha observado que el sistema produce tanto la salida inversa como la no inversa de forma simultanea cumpliendo el objetivo fijado.

En el montaje con elementos discretos se ha observado una baja estabilidad de las salidas producidas. Esto se debe, a que al realizar una configuración interferométrica, el sistema es muy dependiente de que los caminos recorridos por la luz dentro del interferómetro tengan una longitud muy similar, ya que la diferencia entre ellos debe ser menor que la longitud de coherencia, y de que no alteren la polarización de distinta manera. Para solucionar este problema se propone un diseño integrado en InP en la plataforma de integración óptica JePPIX. El test de este sistema integrado queda fuera de este proyecto, ya que el sistema aún está en la fase preliminar de fabricación.

Las tasas de datos alcanzadas en simulación por el sistema son  $20\text{Gbps}$ , lo cual sería suficiente actualmente. Para poder elevar la tasa de datos soportada por el sistema deberá realizarse un estudio sobre posibles modificaciones del conversor de longitud de onda. Estas modificaciones podrían ser el filtrado de la señal a la salida del sistema con filtros que tengan un ligero desplazamiento en longitud de onda, la creación de asimetrías controladas entre los brazos del SOA-MZI o la concatenación de algún otro dispositivo a la salida de este para mejorar su funcionamiento.

En conclusión, la realización de un conversor de longitud de onda con dos salidas (inversa y no inversa) mediante un SOA-MZI se muestra viable en un sistema óptico integrado. Además, con este proyecto se abren nuevas vías de experimentación, que comienzan en análisis del sistema integrado y continúan con el estudio de posibles mejoras del sistema.

# Bibliografía

- [1] M.J. Connelly. *Semiconductor Optical Amplifiers*. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [2] I. Garcés and J. Mateo. Apuntes de Comunicaciones Ópticas. Grupo de Tecnología de las Comunicaciones, Departamento de Ingeniería Electronica y Comunicaciones, Universidad de Zaragoza, 2010.
- [3] K.E. Stubkjaer. Semiconductor optical amplifier-based all-optical gates for high-speed optical processing. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000.
- [4] R. Inohara, K. Nishimura, M. Tsurusawa, and M. Usami. Experimental analysis of cross-phase modulation and cross-gain modulation in SOA-injecting CW assist light. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003.
- [5] M. Hattori, K. Nishimura, R. Inohara, and M. Usami. Bidirectional data injection operation of hybrid integrated SOA-MZI all-optical wavelength converter. *Journal of Lightwave Technology*, 2007.
- [6] J.H. Kim, B.C. Kim, Y.T. Byun, Y.M. Jhon, S. Lee, D.H. Woo, and S.H. Kim. All-optical AND gate using cross-gain modulation in semiconductor optical amplifiers. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004.
- [7] S.H. Kim, J.H. Kim, Y.T. Byun, Y.M. Jeon, S. Lee, D.H. Woo, and S.H. Kim. All-optical NAND gate using cross-gain modulation in semiconductor optical amplifiers. *Electronics Letters*, 2005.
- [8] J. Dong, X. Zhang, Y. Wang, J. Xu, and D. Huang. 40 Gb/s configurable photonic logic gates with XNOR, AND, NOR, OR and NOT functions employing a single SOA. *European Conference and Exhibition of Optical Communication (ECOC)*, 2007.
- [9] J. Dong, X. Zhang, J. Xu, D. Huang, S. Fu, P. Shum, L. Zhang, and Y.D. Gong. 40 Gb/s both inverted and non-inverted wavelength conversion based on transient XPM of SOA. *OFC/NFOEC 2007*, 2007.
- [10] M.-Y. Jeon, D.S. Lim, H.K. Lee, J.T. Aho, D.I. Chang, and K.H. Kim. All-optical wavelength conversion scheme based on 20 Gb/s RZ data. *CLEO 2000*, 2000.
- [11] T.T. Ng, A. Pérez, S. Sales, D.J. Richardson, and P. Petropoulos. Characterization of XGM and XPM in a SOA-MZI using a linear frequency resolved gating technique. *LEOS 2007*, 2007.
- [12] R. Rostam, M.H.A. Washid, S.A.A. Rais, and M.F. Faridus. The effect of signal repetition rate, injected current and switching window on cross-phase modulation in SOA-NOLM. *IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM)*, 2011.
- [13] H. Lee, H. Yoon, Y. Kim, and J. Jeong. Theoretical study of frequency chirping and extinction ratio of wavelength-converted optical signal by XGM and XPM using SOA's. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999.

- [14] M. Born and E. Wolf. *Principles of Optics*. Cambridge University Press, 1999.
- [15] D. Wolfson, T. Fjelde, A. Kloch, B. Dagens, C. Janz, F. Poingt, I. Guillemot, F. Gaborit, A. Coquelin, and M. Renaud. All-optical wavelength conversion scheme in SOA-based interferometric devices. *Electronics Letters*, 2000.
- [16] J.H. Kim, Y.M. Jhon, Y.T. Byun, S. Lee, D.H. Woo, and S.H. Kim. All-optical XOR gate using cross-gain modulation in semiconductor optical amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002.
- [17] S. Kumar and A.E. Willner. Simultaneous four-wave mixing and cross-gain modulation for implementing an all-optical XNOR logic gate using a single SOA. *Optics Express*, 2006.
- [18] R.P. Webb, R.J. Manning, G.D. Maxwell, and A.J. Poustie. 40 Gbit/s all-optical XOR gate based on hybrid-integrated mach-zehnder interferometer. *Electronics Letters*, 2003.
- [19] B.-K Kang, J.H. Kim, Y.H Park, S. Lee, Y.M. Jhon, D.H. Woo, S.H. Kim, and S.-H. Park. All-optical AND in a SOA-based mach-zehnder all-optical wavelength converter. *LEOS 2000*, 2000.
- [20] J.-Y. Kim, J.-M. Kang, T.-Y. Kim, and S.-K. Han. 10 Gbit/s all-optical composite logic gates with XOR, NOR, OR and NAND functions using SOA-MZI structures. *Electronics Letters*, 2006.
- [21] D. Wolfson, A. Kloch, T. Fjelde, C. Janz, B. Dagens, and M. Renaud. 40-Gb/s all-optical wavelength conversion, regeneration, and demultiplexing in an SOA-based all-active mach-zehnder interferometer. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000.
- [22] A. Villafranca, M. Cabezón, D. Izquierdo, J.J. Martínez, and I. Garcés. Programmable all-optical logic gates based on semiconductor optical amplifiers. *ICTON 2011*, 2011.
- [23] L.A. Coldren and S.W. Corzine. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*. John Wiley & Sons, Inc, 1995.
- [24] B.E.A. Saleh and M.C. Teich. *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [25] COBRA Photonic IC design manual. Photonic Integration group, COBRA research center, Eindhoven University of Technology, 2012.

## Apéndice A

# Material Semiconductor. Interacción entre la materia y la luz

A lo largo de este apéndice se estudiará la interacción de la luz con la materia y la estructura de los semiconductores. Para realizar este estudio se han utilizado los libros [1], [23] y [24], y los apuntes de Comunicaciones Ópticas [2].

Para analizar la interacción de la luz con la materia se va a estudiar la estructura básica de los materiales, los distintos procesos de interacción de los portadores y los fotones y las estructuras de los semiconductores en los dispositivos.

Los niveles energéticos de los electrones en los átomos son discretos, es decir, que no pueden tener cualquier energía sino que esta limitada a unos valores concretos. Para calcular estos niveles de energía es preciso resolver la ecuación de Schrödinger. Estos niveles energéticos están determinados por la estructura atómica del material. La luz también está cuantizada en fotones con energía  $E = \hbar\omega$ , donde  $\hbar$  es la constante reducida de Planck y  $\omega$  es la frecuencia angular del fotón.

En un conjunto de átomos, los niveles de energía son perturbados ligeramente por la interacción de los átomos entre ellos, y por ello este conjunto de átomos no tiene unos niveles energéticos únicos sino que crean bandas de energías. La banda de valencia está formada por los niveles energéticos más altos ocupados por electrones de estos átomos y la banda de conducción por los siguientes niveles posibles. La separación entre estas dos bandas es conocida como energía de gap y define los diferentes tipos de materiales, ya que en los metales es nula, en los semiconductores es pequeña y en los aislantes es grande. Una manera simplificada de describir la estructura de las bandas de energías es la existencia de una única banda de conducción y de tres bandas de valencia, la banda de huecos pesados (HH), la banda de huecos ligeros (LH) y la banda de spin-off (SO). La banda HH y la banda LH son degeneradas y por tanto tienen su máximo en el mismo valor energético y en el mismo momento lineal. En la Figura A.1 se puede observar esta distribución de las bandas en un bloque de semiconductor.

Cuando la temperatura del material es  $T=0K$ , todos los electrones están en la banda de valencia, por lo que esta banda está completamente llena y la banda de conducción está vacía. Al incrementar la temperatura parte de los electrones de la banda de valencia saltan a la banda de conducción dejando huecos. Este hueco se comporta a todos los efectos como una partícula. Estos pares electrones-huecos pueden generarse mediante otros mecanismos de excitación, tanto eléctricos como ópticos. La producción y destrucción de estos pares electrón-hueco ocurre mediante distintos procesos, tanto radiativos como no radiativos.

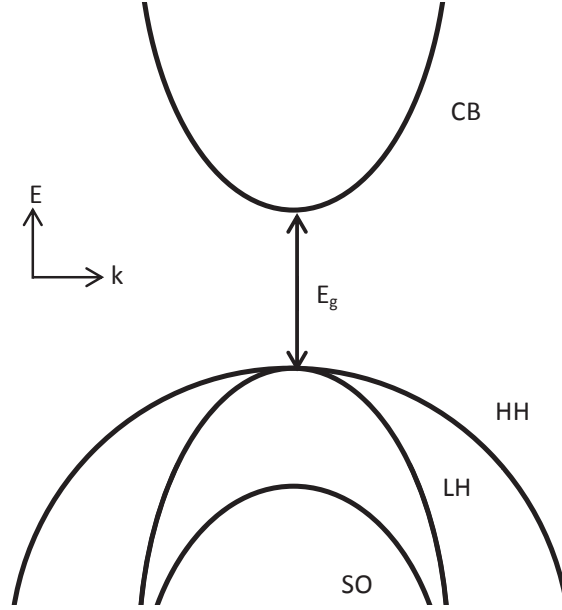


Figura A.1: Estructura simplificada de bandas energéticas de un semiconductor de gap directo. CB: Banda de conducción, HH: Banda de Heavy-Hole, LH: Banda de Light-Hole, SO: Banda de Spin-Off.

Los procesos radiativos son aquellos en los que intervienen un par electrón-hueco y un fotón. Para que esta interacción se produzca deben cumplirse los dos principios de conservación. El principio de conservación de la energía conlleva que la energía de gap que hay entre el electrón y el hueco sea igual a la del fotón. El principio de conservación del momento lineal hace que el electrón y el hueco del par deban tener el mismo momento, ya que el fotón tiene un momento casi nulo. Estos procesos son la absorción estimulada, la emisión estimulada y la emisión espontánea, los cuales se muestran en la Figura A.2.

La absorción estimulada consiste en que un fotón transfiere su energía al átomo. Esta transferencia provoca que un electrón salte de la banda de valencia a la banda de conducción. Para que esta absorción se produzca la energía del gap debe coincidir con la del fotón, ya que para el resto de fotones el material será transparente.

La emisión estimulada consiste en que un fotón provoca la transición de un electrón de la banda de conducción a la banda de valencia produciendo otro fotón que es una copia del primero. Por lo tanto, el nuevo fotón tiene la misma polarización, fase, energía y dirección que el primero, es decir tienen en el mismo modo óptico. Para que este proceso se produzca la energía del fotón estimulador deber ser igual a la energía de gap de los portadores con el mismo momento lineal.

La emisión espontánea consiste en que la recombinación de un electrón de la banda de conducción con un hueco de la banda de valencia mediante la producción de un fotón. Desde un punto de vista más cuántico, como el estudiado en [23], este proceso se puede considerar igual a la emisión estimulada pero cuyo elemento estimulador no es un fotón sino un campo electromagnético no real conocido como campo de vacío. Debido a que el campo de vacío no tiene relación con los campos reales (fotones), los fotones generados por este proceso se producen en todas direcciones, con polarización y fase aleatorias, y con un espectro dependiente del material del dispositivo.

Los nuevos fotones generados mediante emisión estimulada contribuyen constructivamente al campo existente, creando un campo muy coherente. Los fotones creados mediante emisión espontánea tienen un amplio espectro y una fase aleatoria, por lo que contribuyen mínimamente



al campo coherente y en su mayoría son ruido óptico.

Los procesos de emisión, tanto estimulada como espontánea, se maximizan cuando los electrones están mayoritariamente en la banda de conducción, mientras que el proceso de absorción es maximizado cuando los electrones están mayoritariamente localizados en la banda de valencia. Debido a esto, el proceso de absorción ocurre de forma mayoritaria en el estado natural, mientras que para que se produzca la emisión hay que realizar un proceso de inversión de la población de los portadores mediante la inyección de los mismos.

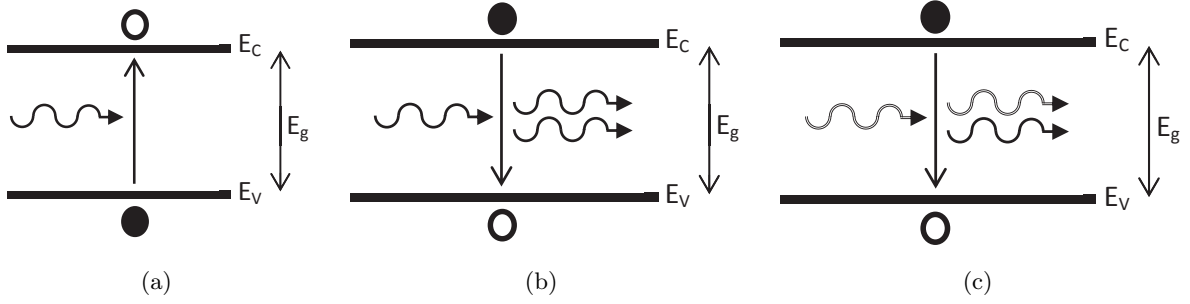


Figura A.2: Transiciones radiativas en un modelo simplificado de dos niveles: (a) Absorción estimulada, (b) Emisión estimulada, (c) Emisión espontánea.

Los procesos no radiativos son aquellos en los que electrones y huecos interactúan sin la intervención de fotones en el proceso. Estos procesos disminuyen la población de electrones, reduciendo la cantidad de luz generada por las recombinaciones radiativas. Estos procesos son recombinación por defectos o impurezas, recombinación por superficie o interfaz, recombinación Auger y la fuga de portadores mediante difusión o deriva. Estos procesos son mostrados en la Figura A.3.

Las recombinaciones por defectos o impurezas provocan la recombinación de un electrón de la banda de conducción con un hueco de la banda de valencia sin emitir fotones. Estos defectos e impurezas crean niveles energéticos en la banda energética prohibida que sirven como nivel intermedio en el proceso de recombinación del par electrón-hueco. Este tipo de recombinación está provocada por defectos en la estructura de red e impurezas que aparecen en el proceso de fabricación o con el envejecimiento del dispositivo.

Las recombinaciones por superficie o interfaz es un mecanismo de recombinación muy similar al de recombinación por defecto o impureza, pero con la diferencia de que los niveles energéticos que aparecen en la banda prohibida no están discretizados sino que son como una minibanda energética que sirve de estado intermedio en la recombinación del par electrón-hueco. Este proceso está originado en la absorción de impurezas del aire a través de las superficies y por tanto se reduce minimizando el tamaño del dispositivo.

La recombinación Auger consiste en la recombinación de un electrón de la banda de conducción y un hueco de la banda de valencia cuya energía de gap es transferida, o a un electrón de la banda de conducción que es excitado a un nivel energético más alto con el consiguiente calentamiento del sistema, o a un hueco de la banda HH que acaba en una banda más profunda como la banda LH o la banda SO. Dependiendo de los estados involucrados se pueden considerar distintos tipos de recombinación: CCCH, en la que se involucran tres estados de electrón de la banda de conducción y un estado de hueco de la banda HH; CHHS, en la que se involucran un estado de electrón de la banda de conducción, dos estados de hueco de la banda HH y un estado de hueco de la banda SO; y CHHL, en la que se involucran un estado de electrón de la banda

de conducción, dos estados de hueco de la banda HH y un estado de hueco de la banda LH. La recombinación CCCH es más importante cuando la densidad de electrones es alta, y la CHHS y la CHHL es más importante cuando la densidad de huecos es alta. La recombinación Auger se incrementa de forma exponencial con la temperatura y es muy dependiente de la energía de gap del material.

Además de estos sistemas de recombinación no radiativa, parte de los portadores se pierden mediante la fuga de portadores a través de las uniones mediante difusión o mediante deriva.

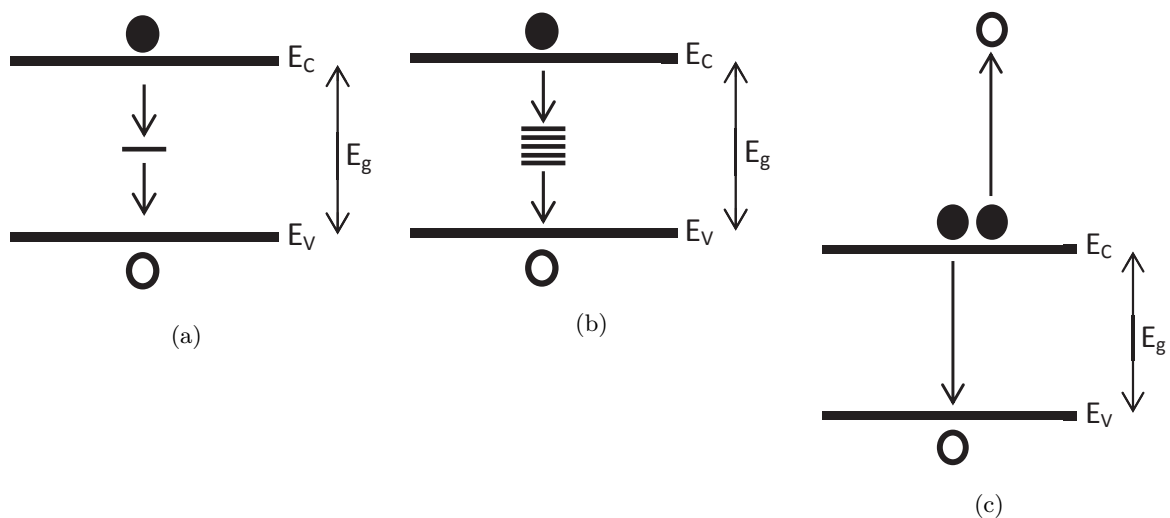


Figura A.3: Transiciones no radiativas en un modelo simplificado de dos niveles: (a) Recombinación por defecto o impureza, (b) Recombinación por superficie o interfaz, (c) Recombinación Auger (CCCH).

A continuación, se va a tratar sobre los materiales y las estructuras que se usan en los dispositivos activos ópticos.

En primer lugar, se va a diferenciar entre los materiales de gap directo y los de gap indirecto. Los materiales de gap directo son aquellos en los que el mínimo energético de la banda de conducción y el máximo energético de la banda de valencia se producen en el mismo valor de momento lineal, mientras que los de gap indirecto este mínimo y este máximo no coinciden en el mismo valor de momento lineal. En los materiales de gap indirecto, la transición entre la banda de conducción y la banda de valencia no se puede hacer directamente mediante un fotón sino que hace falta un fonón, por lo que las transiciones en este tipo de materiales son poco probables. Los materiales como el silicio (Si) o el germanio (Ge) son de gap indirecto y los componentes binarios, terciarios y cuaternarios usados en los dispositivos ópticos, como GaAs o InP, son de gap directo.

En segundo lugar, se van a comentar los materiales intrínsecos y extrínsecos, así como las homouniones y las heterouniones. Los materiales intrínsecos (I) son los semiconductores que no tienen impurezas, por lo que hay pocos electrones en la banda de conducción y pocos huecos en la banda de valencia aunque esto es dependiente de la temperatura. Los materiales extrínsecos son aquellos que están dopados con impurezas y por lo tanto el número de portadores en el material es menos dependiente de la temperatura. Dependiendo del tipo de dopante del material se puede considerar dos tipos de materiales extrínsecos: tipo N y tipo P. Los materiales de tipo N son aquellos en que las impurezas son átomos que tiene un electrón más en su banda más exterior, también llamados donores (P, As), por lo que el material tiene más electrones

disponibles. Los materiales de tipo P son aquellos que son dopados con átomos que tienen un electrón menos en su capa más exterior, los cuales son denominados aceptores (B, Ga), por lo tanto estos materiales tienen más huecos disponibles.

Las homouniones consisten en la unión de un material P y un material N del mismo tipo de semiconductor, mientras que las heterouniones consisten en la unión de un material P y un material N que sean de distinto tipo de semiconductor pero con la misma constante de red. Hay dos tipos de heterouniones: unión óhmica (n-N, p-P) o uniones de otras características (n-P, p-N).

Las homouniones tienen una baja eficiencia de inyección, no se puede controlar la zona de depleción y la luz se emite en un medio altamente absorbente, por lo que se usan heterouniones para solucionar estos problemas.

La mayoría de los dispositivos utilizan doble heterouniones. Una doble heterounión consiste en una doble unión N-p-P o N-n-P. Las capas con mayor energía de gap son de confinamiento y la de menor energía de gap es la zona activa. Además se suelen añadir uniones óhmicas como capas de contacto. Este tipo de dispositivos tienen un mejor contacto con las capas exteriores, una elevada eficiencia de inyección debido a que la heterounión eleva el confinamiento de los portadores en la zona activa, un elevado confinamiento de la luz por el perfil de índice que aparece en la zona activa y evita que los portadores generados en la zona activa sean absorbidos por las capas confinantes.

En las dobles heterouniones es importante que los semiconductores usados tengan la misma estructura cristalina y las mismas constantes de red. Los semiconductores típicamente usados son semiconductores III-V, ya que emiten en el rango 0.7 a 1.6  $\mu\text{m}$  y son materiales de gap directo. Para la emisión en el rango de 0.7 a 0.9  $\mu\text{m}$  se utiliza una doble heterounión de AlGaAs/GaAs, y para la emisión en el rango de 1.0 a 1.6  $\mu\text{m}$  se utiliza InGaAsP/InP.

Finalmente, se va a realizar la comparación de las características del dispositivo dependiendo de la forma de su zona activa, si esta es un bulk o es un quantum well (QW).

Un material es considerado bulk cuando todas sus dimensiones son mayores a la longitud de onda de Broglie ( $\lambda_B = h/p$ , donde  $h$  es la constante de Planck y  $p$  es el momento lineal de los portadores), mientras que es considerado QW cuando al menos una de sus dimensiones sea menor que  $\lambda_B$ . Si se colocan varios QW separados por barreras de materiales no activos se habla de multiquantum well (MQW).

Mientras que las bandas energéticas en el bulk son continuas y tienen forma parabólica, en el QW se convierten en discretas y el movimiento de los portadores en la dirección normal a la capa está restringido y por tanto aparecen subbandas tanto en la banda de conducción como en la banda de valencia.

Cuando se depositan sobre un sustrato pequeñas cantidades de un semiconductor con constante de red ligeramente diferente a la del sustrato esta se tiende a acomodar a la del sustrato. Esto puede ocurrir en los QW y se conoce como strained QW. Hay dos tipos de strained o forzado del QW: compresivo o de tensión.

El ancho de banda de ganancia del QW es mayor que el de bulk. Esto se debe a su diferente densidad de estados, ya que el bulk es continuo y en QW tiene forma de escalera. Por lo tanto la ganancia en un bulk es muy dependiente de la energía del fotón mientras que el QW reduce esta dependencia y consigue tener una ganancia más plana. Además, en el bulk la ganancia es

muy dependiente de la corriente de inyección de portadores, cuya variación provoca un desplazamiento del pico de la ganancia, esto no ocurre en el QW.

La dependencia de la polarización en un bulk viene determinada por los diferentes factores de confinamiento que tiene la polarización TE y la polarización TM. En un QW, la dependencia de la polarización viene dada porque las transiciones entre la banda de conducción y la banda HH son mas favorables para la polarización TE mientras que las transiciones entre la banda de conducción y la banda LH son más favorables para la polarización TM. En los QW, la banda HH y la banda LH ya no están degeneradas y por tanto no tiene el máximo con la misma energía, lo que hace que las transiciones entre la banda de conducción y la banda LH sean menos probables que las transiciones entre la banda de conducción y la banda HH. Esto se puede solucionar utilizando strained QW. Si realizamos un strained QW de tensión, el borde de la banda LH se acerca al borde de la banda de conducción, por lo que se incrementa la ganancia TM y así se reduce la dependencia de la polarización. En el caso de usar un strained QW compresivo, el borde de la banda HH se acerca al borde de la banda de conducción por lo que la dependencia de la polarización se incrementa.

## Apéndice B

# Montajes experimentales

### B.1. Montaje para caracterizar la ganancia y potencia de salida de un SOA

Para llevar a cabo la caracterización de la ganancia y de la potencia de salida de los SOAs-NL se va a realizar el montaje mostrado en la Figura B.1.

Este montaje se basa en que una señal óptica continua sea amplificada por el SOA. Como se puede ver en la Figura B.1, el montaje se puede dividir en 4 partes: Emisor, equipo de control, SOA y equipo de medida.

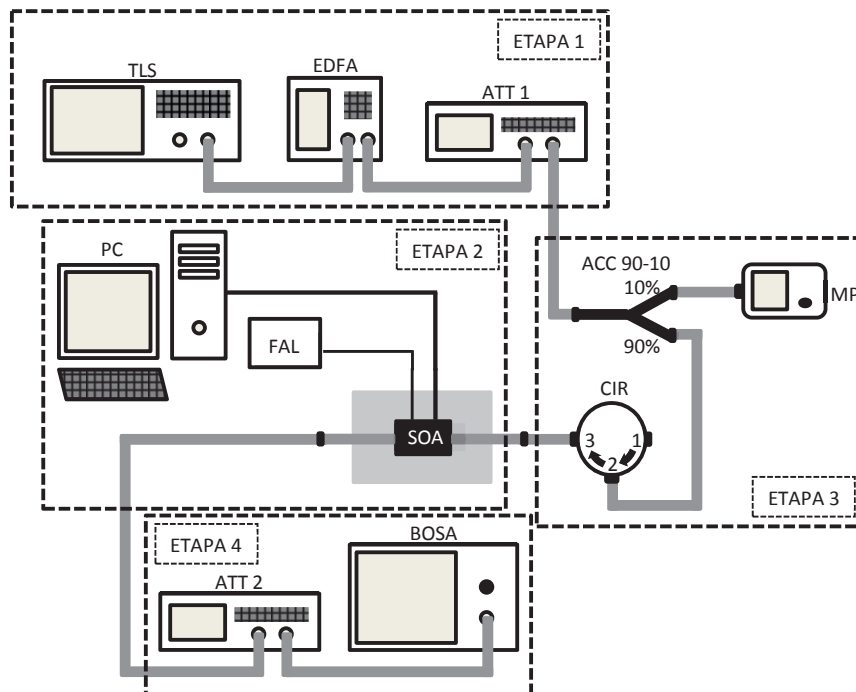


Figura B.1: Montaje para la medida de la ganancia y la potencia de salida del SOA. TLS: TLS AGILENT 8164A, EDFA: HWT EDFA C20 G20 de Highwave Optical Thecnologies, ATT 1: Atenuador variable JDS Fitel HA1, ACC 90-10: Acoplador 90-10, MP: Medidor de potencia Noyes OPM4, CIR: Circulador, PC: Ordenador, FAL: Fuente de Alimentación, ATT 2: Atenuador variable HP 8156A, BOSA: BOSA de Aragón Photonics.

La primera etapa (Etapa 1 de la Figura B.1) utiliza como fuente óptica básica un Tuneable Laser Source (TLS) AGILENT 8164A. Este TLS es una laser monocromático continuo que permite seleccionar la longitud de onda de emisión. Esta fuente no alcanza la potencia necesaria para caracterizar correctamente la ganancia del SOA, por lo que hay que amplificar la luz antes de que llegue al mismo. Para realizar esta amplificación se utiliza un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) HWT EDFA C20 G20 de la empresa Highwave Optical Technologies. Este EDFA debería ser filtrado para evitar que el ruido, que se introduce mediante emisión espontánea amplificada (ASE), ensancha el espectro de la fuente óptica. En este caso la potencia del TLS es suficientemente alta como para poder despreciar el ASE introducido por el EDFA y seguir considerando la fuente monocromática. Finalmente para controlar correctamente el rango de potencias que entran al SOA se coloca un atenuador variable JDS Fitel HA1 después del EDFA.

La segunda etapa (Etapa 2 de la Figura B.1) sirve para controlar la potencia de la señal que entra al SOA. Esta parte consiste en un acoplador 90-10. Este dispositivo desvía el 10 % de la señal de entrada a un medidor de potencia Noyes OPM4 para tener controlada en todo momento su potencia. El 90 % restante debería ir directamente al SOA, pero durante el montaje se ha detectado una reflexión indeseada del ASE producido por el SOA dentro del acoplador y la señal medida en el medidor de potencia no es correcta. Para eliminar esta reflexión se ha colocado un circulador entre el acoplador y el SOA, de tal manera que el ASE producido por el SOA no llegue al acoplador y así no se produzca la reflexión.

El tercera etapa (Etapa 3 de la Figura B.1) es el dispositivo a caracterizar. Este dispositivo es un SOA no lineal de la compañía CIP, cuyas hojas de características se presentan en el Apéndice C.2. Este elemento está montado en una placa que permite controlar la intensidad de alimentación y la temperatura de operación del SOA por ordenador.

La última etapa (Etapa 4 de la Figura B.1) es el sistema de medida del dispositivo. El SOA no solo amplifica la señal de entrada sino que también produce ASE y por ello no puede ser medida la potencia óptica de la señal como la potencia óptica total. Por lo tanto, en lugar de utilizar un medidor de potencia, debe utilizarse un analizador de espectros ópticos. En esta medida se ha utilizado un analizador de espectro ópticos de alta resolución (BOSA) de la compañía Aragón Photonics.

Gracias a este BOSA se puede medir la potencia únicamente en la longitud de onda de interés. Para evitar que el BOSA se sature y muestre una medida incorrecta de la potencia hay que colocar un atenuador HP 8156A con el que se introduce una atenuación fija de  $16,99\text{dB}$ . Además, para obtener una medida más estable y correcta de la potencia se va a realizar el promediado de varias medias consecutivas. Este proceso no es directo y para ello hay que realizar los siguientes pasos. En primer lugar hay que fijar la posición de la longitud de onda a la que entra la señal. Esto debe ser realizado para evitar que el pico de potencia se desplace y distorsione el espectro de la señal. Este desplazamiento es provocado por la alta resolución del BOSA que hace la longitud de onda tenga ligeros movimientos. En segundo lugar hay que activar el control de polarización para que la medida sea independiente de la polarización de la señal. En último lugar se activa el promediado de 16 medidas.

## B.2. Montaje para obtener el espectro de emisión del SOA

El montaje realizado para medir el espectro de emisión del SOA es mostrado en la Figura B.2. Este montaje es casi igual que el montaje mostrado en el Apéndice B.1. Las etapas 1, 2 y 3 son las exactamente iguales, mientras que la etapa 4 es distinta.

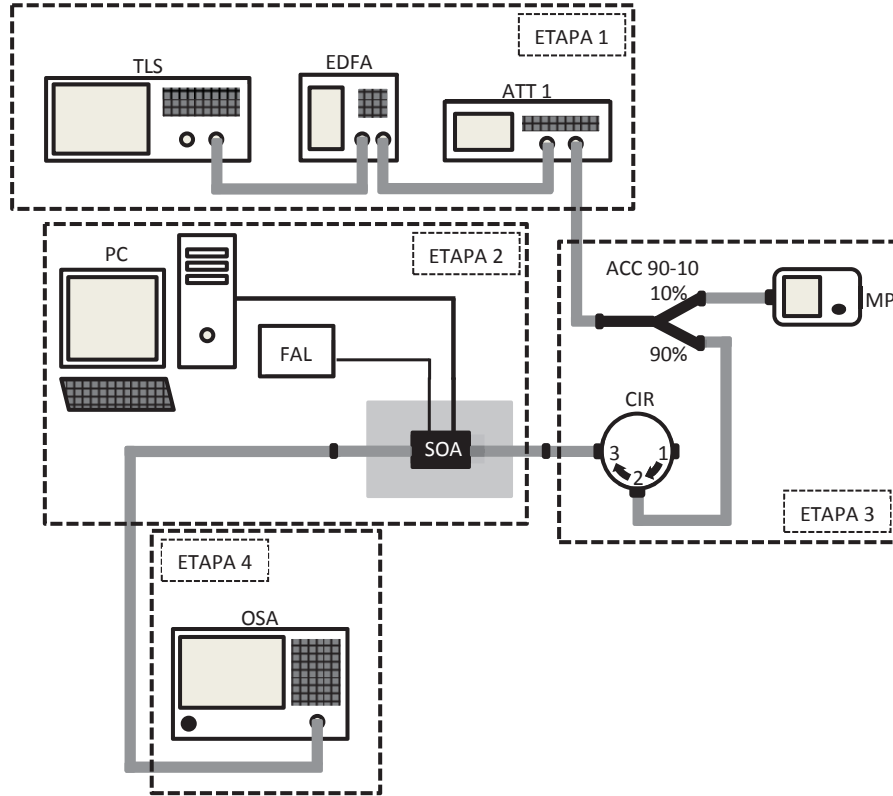


Figura B.2: Montaje para la medida de espectro de emisión del SOA. TLS: TLS AGILENT 8164A, EDFA: HWT EDFA C20 G20 de Highwave Optical Thecnologies, ATT 1: Atenuador variable JDS Fitel HA1, ACC 90-10: Acoplador 90-10, MP: Medidor de potencia Noyes OPM4, CIR: Circulador, PC: Ordenador, FAL: Fuente de Alimentación, OSA: ANRITSU MS9710B.

Esta etapa diferente (Etapa 4 de la Figura B.2) consiste en un OSA ANRITSU MS9710B. Este OSA permite analizar el espectro de emisión completo del SOA. Se ha decidido usar este OSA en lugar del BOSA porque el rango de medida del BOSA no es suficiente para caracterizar todo el espectro completo del SOA, aunque la resolución sea menor.

### B.3. Montaje para caracterizar XGM del SOA

El montaje realizado para caracterizar la modulación de ganancia cruzada (XGM) en un SOA-NL es el mostrado en la Figura B.3. Este montaje consiste básicamente en la generación de dos señales moduladas RZ a dos longitudes de onda distintas, que son introducidas al SOA en esquema copropagante. Los datos de la señal modulada siguen un patrón aleatorio y la tasa de datos es de  $10\text{Gbps}$ . Este montaje se puede dividir en 3 etapas: Emisor, SOA y equipo de medida.

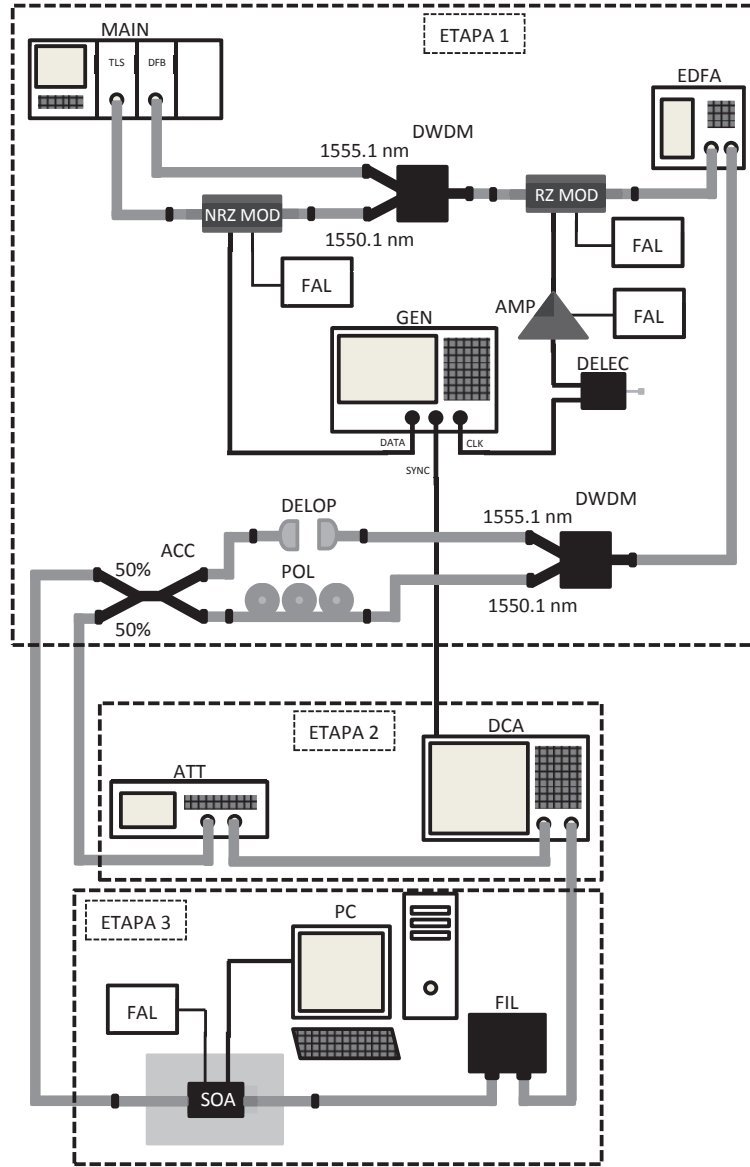


Figura B.3: Montaje para la medida de XGM del SOA. MAIN: OSICS MAINFRAME, DFB: Laser OSICS DFB a 1555.1 nm, TLS: Laser OSICS TLS-AG a 1550.1 nm, NRZ MOD: Modulador AVANEX, RZ MOD: Modulador MX-LN10, GEN: Generador de Señales ANRITSU MP1800A, AMP: Amplificador RF SA1137-2A, DELEC: Delay eléctrico SMF 2000DEL WOC, DWDM: DWDM 2x8, DELOP: VARIABLE OPTICAL DELAY LINE de GENERAL PHOTONICS, POL: Control de Polarización 1-888-91-FIBER de FIBER CONTROL INDUSTRIES, ACC 50-50: Acoplador 50-50, EDFA: HWT EDFA C20 G20 de Highwave Optical Thecnologies, PC: Ordenador, FAL: Fuente de Alimentación, FIL: Filtro sintonizable Optoplex, ATT 1: Atenuador variable JDS Fitel HA1, DCA: AGILENT infinium DCA 86100B.



La primera parte (Etapa 1 de la Figura B.3) es el sistema de generación de las dos señales ópticas que se introducirán al SOA-NL. Para generar la señal de probe se utiliza como fuente óptica un láser OSICS DFB a  $1555,1nm$  y para generar la de pump se usa como fuente óptica un láser OSICS TLS-AG a  $1550,1nm$ , que es modulada NRZ con los datos mediante un modulador AVANEX. Estas dos señales son multiplexadas mediante un DWDM para ser moduladas RZ mediante un modulador MX-LN10. Para que la señal de reloj que modula RZ el probe y el pump este sincronizada con los datos que han modulado el pump se utiliza un delay eléctrico SMF 2000 DEL WOC. Tanto la señal de datos como la señal de reloj son generadas mediante un Generador de Señales ANRITSU MP1800A. La señal de reloj es una señal auxiliar de este generador y por lo tanto debe ser amplificada mediante un amplificador RF SA1137-2A para que tenga suficiente amplitud. Después de que las dos señales hayan sido moduladas RZ, son amplificadas mediante un HWT EDFA C20 G20 de Highwave Optical Technologies. Tras esta amplificación las señales son demultiplexadas y se controla que tengan la misma polarización, mediante un Control de Polarización 1-888-91-FIBER de la empresa FIBER CONTROL INDUSTRIES, y el delay relativo entre las dos señales introducidas al SOA, mediante un VARIABLE OPTICAL DELAY LINE de GENERAL PHOTONICS. Después de esto, las dos señales son acopladas mediante un acoplador 50-50. Una de las salidas de acoplador se inyectará en el SOA y la otra irá a los equipos de medida para tomarla como referencia.

La segunda parte (Etapa 3 de la Figura B.3) es el SOA-NL que se va a caracterizar. Este SOA-NL es de la compañía CIP, cuyas hojas de características pueden ser consultadas en C.2. Este SOA es montado en una placa, la cual sirve para alimentarlo y controlar sus parámetros de operación. La salida de este SOA es filtrada, mediante un filtro sintonizable Optoplex que es fijado a  $1555,1nm$ , y después irá a los equipos de medida.

La tercera parte (Etapa 2 de la Figura B.3) es el equipo utilizado para medir tanto la señal de referencia de los emisores como la salida del SOA. La señal de referencia es atenuada mediante un atenuador variable JDS Fitel HA1 para que no sature el AGILENT Infinium DCA 86100B. La señal de referencia y la señal de salida se van alternando en la misma entrada del DCA. La señal de referencia es utilizada para calcular la potencia de las señales de entrada y el delay entre las mismas. Para calcular la potencia de las dos señales se asume que el filtrado realizado por el DWDM minimiza el ruido generado por el EDFA, y que la modulación realizada por los moduladores es prácticamente perfecta. En el DCA se presentan las dos señales simultáneamente y por tanto para calcular la potencia del probe se observa el nivel de la señal cuando en el pump hay un cero y la potencia del pump se calcula como diferencia de potencia entre cuando el pump es uno y es cero. Es necesario realizarlo así, ya que la desconexión de una de las dos señales afecta a la otra debido al EDFA. Para calcular el delay entre las dos señales se puede calcular con las señales independientemente. Con la señal de salida del SOA se calcula la potencia del uno y del cero y así se caracteriza el XGM del SOA.

## B.4. Montaje para caracterizar XPM del SOA

El montaje utilizado para caracterizar la modulación de fase cruzada (XPM) se muestra en la Figura B.4. Este sistema se basa en la inyección de dos señales, una modula NRZ y una señal continua, a dos longitudes de onda en un SOA-NL mediante un esquema copropagante. Los datos que modulan la señal de entrada siguen el patrón fijo 11110000 y la tasa de datos es de  $10\text{Gbps}$ . Este montaje puede dividirse en 3 partes: Emisor, SOA y aparatos de medida.

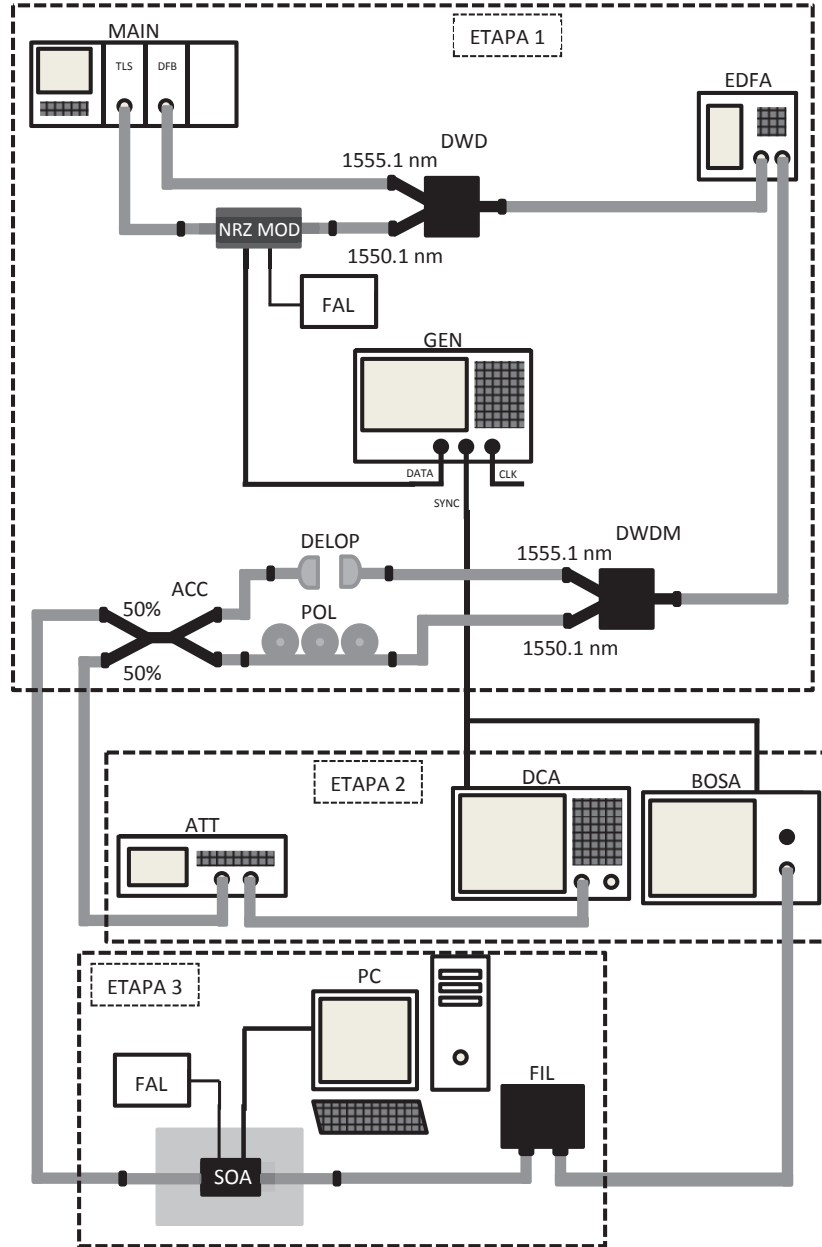


Figura B.4: Montaje para la medida de XPM del SOA. MAIN: OSICS MAINFRAME, DFB: Laser OSICS DFB a 1555.1 nm, TLS: Laser OSICS TLS-AG a 1550.1 nm, NRZ MOD: Modulador AVANEX, GEN: Generador de Señales ANRITSU MP1800A, DWDM: DWDM 2x8, DELOP: VARIABLE OPTICAL DELAY LINE de GENERAL PHOTONICS, POL: Control de Polarización 1-888-91-FIBER de FIBER CONTROL INDUSTRIES, ACC 50-50: Acoplador 50-50, EDFA: HWT EDFA C20 G20 de Highwave Optical Thecnologies, PC: Ordenador, FAL: Fuente de Alimentación, FIL: Filtro sintonizable Optoplex, ATT 1: Atenuador variable JDS Fitel HA1, DCA: AGILENT infinium DCA 86100B, BOSA: BOSA Phase de Aragón Photonics.

La primera etapa (Etapa 1 de la Figura B.4) consiste en la generación del pump y el probe que se van a introducir en el SOA-NL. La señal de probe es generada mediante un láser OSICS DFB a  $1555,1nm$  y la señal del pump es generada mediante un láser OSICS TLS-AG a  $1550,1nm$ , la cual es modulada NRZ mediante un modulador AVANEX. Después de esto las dos señales son multiplexadas mediante un DWDM y amplificadas mediante un HWT EDFA C20 G20 de Highwave Optical Technologies. Después de ello las señales se demultiplexan y pasan por el Control de Polarización 1-888-91-FIBER de la empresa FIBER CONTROL INDUSTRIES y el delay óptico VARIABLE OPTICAL DELAY LINE de GENERAL PHOTONICS. Estas dos señales son acopladas mediante un Acoplador 50-50. Una de las salidas del acoplador irá a parar al sistema de medida como señal de referencia y la otra se inyectará al SOA-NL.

La segunda etapa (Etapa 3 de la Figura B.4) es el SOA-NL que se va a caracterizar con este montaje. Este SOA es un SOA-NL de la compañía CIP, cuyas hojas de características pueden ser consultadas en el Apéndice C.2. La salida del SOA es filtrada mediante un filtro sintonizable Optoplex que es fijado a  $1555,1nm$  y después la señal va a los equipos de medida.

La tercera etapa (Etapa 2 de la Figura B.4) consiste en los equipos de medida, tanto de la señal de referencia como de la salida del SOA. La señal de referencia se mide mediante AGILENT Infinium DCA 86100B, en el cual se observa la potencia del probe y del pump. Como estas dos señales se observan simultáneamente en el DCA y la potencia del probe será la potencia observada en el DCA cuando el pump este en un cero, mientras que la potencia del pump será la potencia medida cuando el pump está en un uno menos la potencia del probe. Para realizar esta medida se asume que el filtrado de las señales mediante el DWDM después de su amplificación reduce a niveles despreciables el ASE producido mediante el SOA y que la modulación del pump es casi perfecta, por lo que el nivel del cero del pump se puede considerar sin potencia. La salida del SOA-NL se medirá mediante un BOSA Phase de APL, el cual bajo una serie de parámetros nos permite medir la fase relativa temporal de la señal. Para que esta medida sea correcta la señal y el BOSA Phase deben ser configurarse de tal manera que la señal enviada al BOSA Phase produzca un espectro adecuado a los filtros que este tiene incorporados para la medida de la fase. Esta configuración consistió en la generación de un patrón de datos de ocho bits con una tasa de datos de  $10Gbps$ , para que la medida se situara en el filtro de  $1,25GHz$  con un ancho de banda seleccionado de  $10GHz$ . Después de tomar los datos se procesaron mediante Matlab para obtener la diferencia de fase que hay en la señal de salida cuando está presente o no la señal moduladora.

## B.5. Montaje de simulación con modulación RZ

En la Figura B.5 se muestra el montaje utilizado en la simulación del convertor de longitud de onda para la modulación RZ en el programa VPI. Este esquema es utilizado para simular los diferentes escenarios y parámetros del sistema antes de realizar el montaje mediante elementos discretos y la integración.

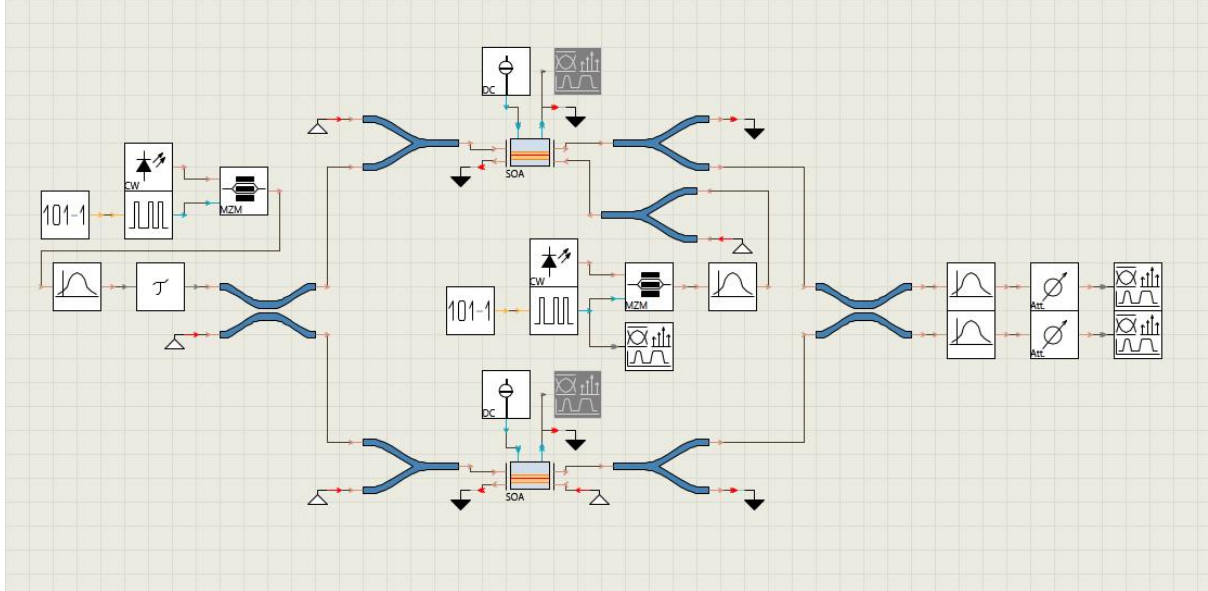


Figura B.5: Montaje para la simulación del convertor de longitud de onda con modulación RZ.

El esquema consiste en dos generadores de longitud de onda continua que son modulados RZ, uno con los datos PRBS (pump) y el otro con un reloj (probe). Estas señales son filtradas para conseguir una forma de onda más real en lugar de utilizar las ondas cuadradas que nos proporcionarían los moduladores. Además el probe tiene un delay para poder controlar el desfase entre este y la señal del pump.

La señal del probe es inyectada a los dos SOAs mediante un acoplador 50-50 y la señal de pump es inyectada mediante un divisor 50-50 en uno de los dos SOAs. Después las señales de los dos SOAs son acopladas mediante un acoplador 50-50 para que se produzca la interferencia. Se han dispuesto cuatro divisores 50-50, uno antes de cada SOA y otro después de cada SOA, para que los dos brazos sean simétricos y poder realizar estudios de distintos esquemas de inyección del pump.

Finalmente, las señales de salida del segundo acoplador 50-50 son filtradas para retirar el ruido generado por el SOA y eliminar completamente la señal de pump. Además, antes de los analizadores se colocaron atenuadores en la señal para controlar la amplitud de las señales de salida.

## B.6. Montaje de simulación con modulación NRZ

En la Figura B.6 se muestra el montaje utilizado en la simulación del convertor de longitud de onda para la modulación NRZ en el programa VPI. Este esquema es utilizado para simular los diferentes escenarios y parámetros del sistema antes de realizar el montaje mediante elementos discretos y la integración.

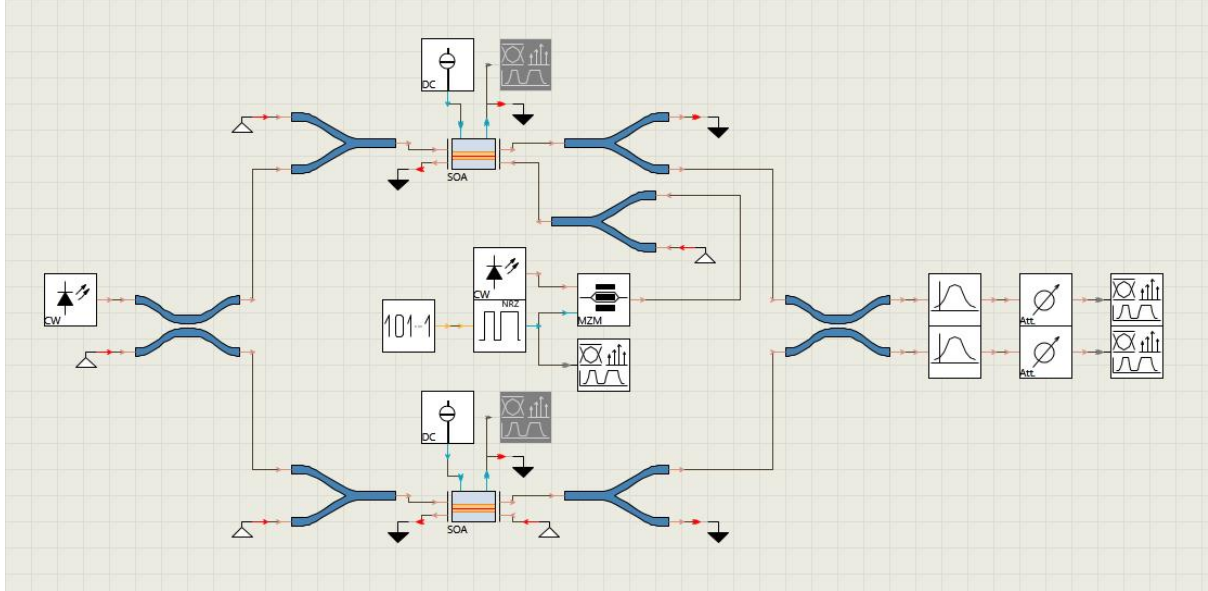


Figura B.6: Montaje para la simulación del convertor de longitud de onda con modulación NRZ.

El sistema utilizado para simular el sistema con modulación NRZ es igual que el utilizado para simular el esquema con modulación RZ, mostrado en el Apéndice B.5, con la única diferencia de los generadores de las señales de entrada.

La señal de probe consiste en un laser continuo que es inyectado directamente en el acoplador 50-50 de entrada. La señal de pump se basa en un laser continuo modulado mediante un modulador NRZ con una secuencia de datos PRBS o el patrón de datos fijos 11110010, que es inyectada a uno de los dos SOAs mediante un divisor 50-50.

## B.7. Montaje del conversor de longitud de onda

El montaje que se muestra en la Figura B.7 es el utilizado para realizar la prueba de concepto del conversor de longitud de onda diseñado. El sistema consiste en la generación de las señales de pump y probe, que serán inyectadas en el conversor de longitud de onda realizado mediante elementos discretos. El pump es modulado NRZ con un patrón de datos de ocho bits fijo 11110010 con tasas de datos de 2,5Gbps y 10Gbps. Este montaje puede dividirse en 3 etapas: Emisor, conversor de longitud de onda y aparato de medida.

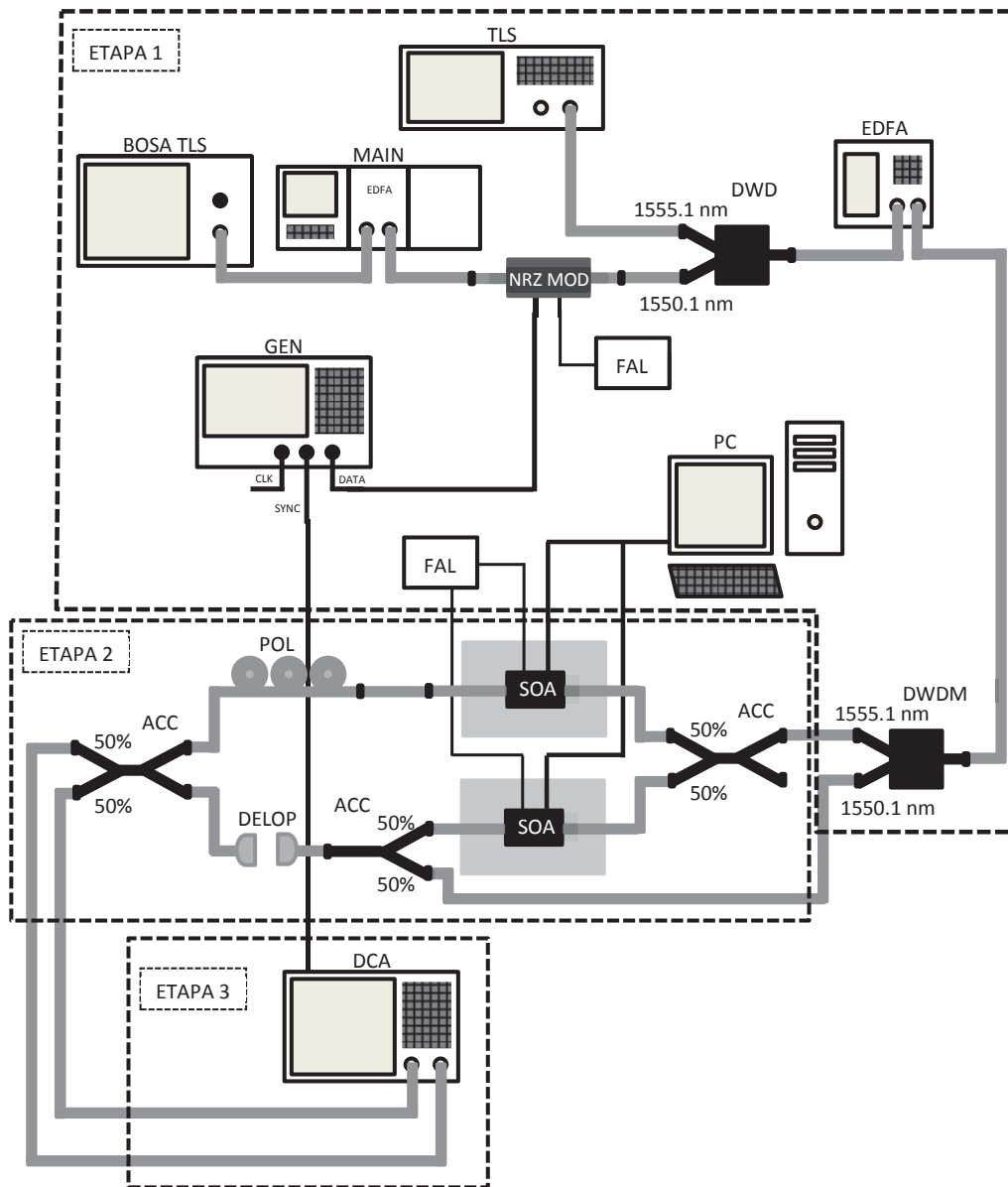


Figura B.7: Montaje para realizar la prueba de concepto del conversor de longitud de onda. TLS: TLS AGILENT 8164A a 1555.1 nm, BOSA TLS: TLS BOSA de Aragón Photonics a 1550.1 nm, MAIN: OSICS MAINFRAME, EDFA MAIN: NETTEST OSICS EDFA, NRZ MOD: Modulador AVANEX, DWDM: DWDM 2x8, EDFA: HWT EDFA C20 G20 de Highwave Optical Thecnologies, ACC 50-50: Acoplador 50-50, DELOP: Linea de retardo óptico, POL: Control de Polarización 1-888-91-FIBER de FIBER CONTROL INDUSTRIES, PC: Ordenador, FAL: Fuente de Alimentación, GEN: Generador de Señales ANRITSU MP1800A, DCA: AGILENT infinium DCA 86100B.

La primera etapa (Etapa 1 de la Figura B.7) sirve para generarlas señales de entrada del conversor de longitud de onda. La señal de probe es una señal óptica continua generada mediante un TLS AGILENT 8164A a  $1555,1nm$ . La señal del pump es generada a  $1550,1nm$  mediante un el TLS que lleva incorporado el BOSA de APL, el cual es amplificado mediante el NETTEST OSICS EDFA. Después de ser amplificado, el pump es modulado NRZ mediante un modulador AVANEX. Los datos con los que se modula el pump son generados mediante un Generador de Señales ANRITSU MP1800A. El probe y el pump son multiplexados mediante un DWDM para ser amplificadas conjuntamente mediante un HWT EDFA C20 G20 de Highwave Optical Technologies y después son demultiplexadas mediante el DWDM.

La segunda etapa (Etapa 2 de la Figura B.7) es el conversor de longitud de onda diseñado. Esto consiste en un acoplador 50-50 que divide el probe en dos señales iguales que son inyectadas a los dos SOAs. Después del SOA inferior se coloca un divisor 50-50 para poder inyectar el pump en esquema contrapropagante y una línea de retardo óptico para poder hacer un ajuste fino de la diferencia de longitud de los dos brazos del SOA-MZI. Tras el SOA superior se coloca una fibra óptica, para que la longitud de los dos brazos del SOA-MZI sea la más parecida posible antes de realizarse el ajuste fino, y un Control de Polarización 1-888-91-FIBER de FIBER CONTROL INDUSTRIES, para poder conseguir que la polarización de los dos brazos sea la misma. Después de esto las señales de los dos brazos se acoplan mediante un acoplador 50-50 para que se produzca la interferencia del SOA-MZI y así producir las dos salidas, la inversa y la no inversa.

La tercera etapa (Etapa 3 de la Figura B.7) es el sistema de medida utilizado para medir la señal inversa y no inversa. Este sistema de medida consiste en un AGILENT infinium DCA 86100B, en el que se visualizaran las dos salidas a la vez para poder ver que una reproduce el patrón de la señal de entrada y la otra el patrón inverso, y que esto ocurre de forma simultánea.





## Apéndice C

# Hojas de especificaciones

### C.1. Características generales del chip en JePPIX

En la Figura C.1 se muestra la disposición de las capas de las obleas de integración de la plataforma de integración óptica JePPIX del Instituto COBRA de la Universidad Técnica de Eindhoven (TUE). Las capas azules corresponden con las capas de cladding o confinamiento de la luz, las capas verdes corresponden con las capas de guiado de la luz y la zona roja corresponde con la capa activa.

active				passive			
Layer	Material	Doping	$d$ [nm]	Layer	Material	Doping	$d$ [nm]
III-5	p-InGaAs	$1.5 \cdot 10^{19}$	280	III-5	p-InGaAs	$1.5 \cdot 10^{19}$	280
III-4	p-Q1.4	$7.2 \cdot 10^{18}$	10	III-4	p-Q1.4	$7.2 \cdot 10^{18}$	10
III-3	p-Q1.2	$4.7 \cdot 10^{18}$	10	III-3	p-Q1.2	$4.7 \cdot 10^{18}$	10
III-2	p-InP	$1.0 \cdot 10^{18}$	1000	III-2	p-InP	$1.0 \cdot 10^{18}$	1000
III-1	p-InP	$5.0 \cdot 10^{17}$	300	III-1	p-InP	$5.0 \cdot 10^{17}$	300
I-7	p-InP	$3.0 \cdot 10^{17}$	200	II-4	n-InP	$5.0 \cdot 10^{17}$	20
I-6	p-Q1.25	$1.0 \cdot 10^{17}$	50	II-3	n-Q1.25	$5.0 \cdot 10^{17}$	20
I-5	i-Q1.25		158	II-2	n-InP	$6.0 \cdot 10^{16}$	200
I-4	i-MQW (4)		84	II-1	n-Q1.25	$6.0 \cdot 10^{16}$	500
I-3	i-Q1.25		208	I-2	n-InP	$5.0 \cdot 10^{17}$	500
I-2	n-InP	$5.0 \cdot 10^{17}$	500	I-1	n-InP	$1.0 \cdot 10^{18}$	500
I-1	n-InP	$1.0 \cdot 10^{18}$	500	I-0	n-InP	$1-4 \cdot 10^{18}$	substrate
I-0	n-InP	$1-4 \cdot 10^{18}$	substrate				

Figura C.1: Disposición de las capas de las obleas de integración de la plataforma JePPIX. Esta imagen ha sido tomada de [25].

En la Figura C.2 se muestra la celda predefinida de la oblea que se utilizará en la integración de este sistema. Más concretamente dos de las zonas activas de  $500\mu m$  de la zona superior de la celda.

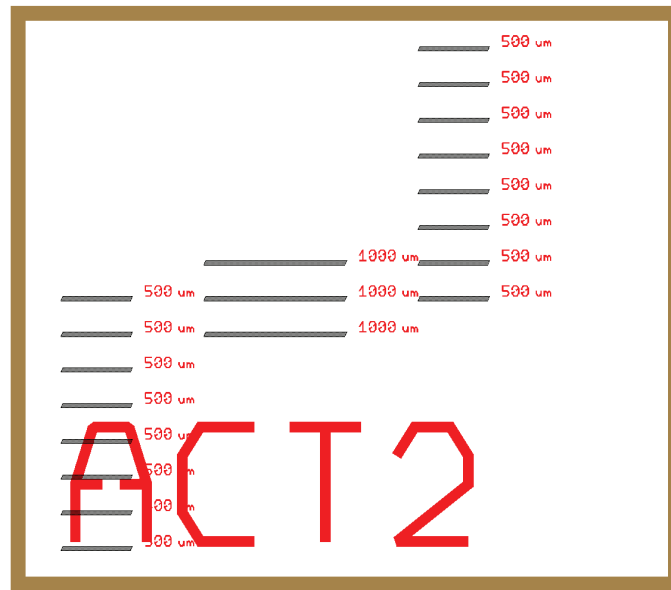


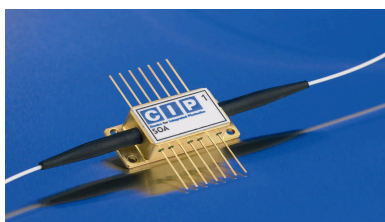
Figura C.2: Celda predefinida de la oblea de integración. Esta imagen ha sido tomada de [25].

## C.2. Especificaciones del SOA-NL de CIP

PRELIMINARY DATASHEET | SOA-XN-OEC-1550



### SOA-XN-OEC-1550 - 1.55 $\mu$ m Non-Linear Semiconductor Optical Amplifier (SOA)



#### Features

- 1.55 $\mu$ m operation
- High gain
- Low saturation output power
- Very fast gain recovery times
- Low saturated PDG
- InP Buried Heterostructure design
- TEC cooled
- Available as packaged device
- APC connectors provided

#### Application Examples

- All optical processing
- Wavelength conversion
- Cross-phase modulation
- Cross-gain modulation
- Four-wave mixing

#### Description

The ultra non-linear SOA-XN is a high confinement factor device optimised for high gain and very fast gain recovery providing very fast optical switching speeds. It utilises CIP's proprietary InP buried heterostructure design and is available in either a 14-pin butterfly package with a thermistor, thermo-electric cooler and single mode fibre pig-tails

The product is appropriate in wavelength converter or four wave mixing applications and can also be used in CIP's hybrid integrated regenerator/wavelength converter products. Custom specification variants may be defined as appropriate for other non-linear applications. Arrays of non-linear SOAs are also available either packaged or as chip-on-carrier.

**Optical and electrical specifications** All measurements are at chip temperature of 20°C & 1535-1560nm unless stated otherwise.

Item	Test condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Small signal Gain	I = 500mA		25		dB
Polarisation Dependent Saturated Gain (PDG)	I = 500mA, P <sub>in</sub> >0dBm		1		dB
Saturated Output Power (SOP)	I = 500mA		12		dBm
Gain Peak	I = 500mA	1550		1570	nm
Saturated Gain Recovery Time (1/e)	I = 500mA, P <sub>in</sub> >0dBm, 1555nm		10		ps
3dB Optical bandwidth	I = 500mA		35		nm

[www.ciphotonics.com](http://www.ciphotonics.com)

.....photonic solutions

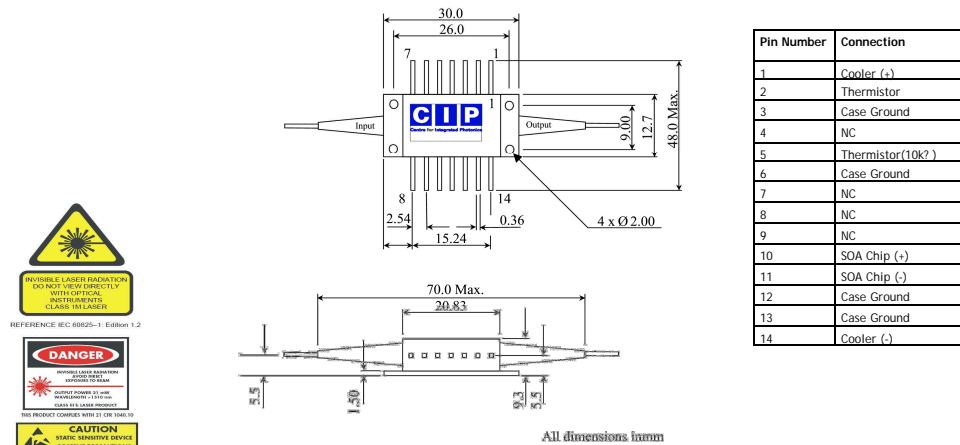
CIP Technologies, Adastral Park, Martlesham Heath, Ipswich, IP5 3RE, UK Tel: +44 (0) 1473 663210 info@ciphotonics.com REV: F

**Absolute maximum ratings**

Item	Symbol	Rating	Unit
Maximum DC current forward bias	$I_{Fmax}$	600	mA
Maximum DC voltage forward bias	$V_{Fmax}$	5.0	V
Maximum DC voltage reverse bias	$V_{Rmax}$	2.0	V
Maximum optical input power	$P_{Max}$	+13	dBm
Maximum TEC current	$TEC_{IM}$	2.0	A
Maximum TEC voltage	$TEC_{VM}$	3.6	V
Case operating temperature	T	15-40	°C
Storage temperature	$T_s$	10-70	°C
Fibre type	SMF-28 900µm tight buffer, >1m		

**Ordering Information— Part Number SOA-XN-OEC-1550**

For custom products please contact CIP Sales on +44 1473 663210 or e-mail [sales@ciphotonics.com](mailto:sales@ciphotonics.com).  
For details of your local agent, visit [www.ciphotonics.com](http://www.ciphotonics.com)

**Wiring Diagram and Dimensions**

CIP reserves the right to make changes in the design, specifications and other information at any time, and without prior notice. The information contained within the Data Sheet is believed to be accurate. However, no responsibility is assumed for possible inaccuracy or omission. Any information contained herein shall legally bind CIP only if it is specifically incorporated in the terms and conditions of a sales agreement.

Parts of this product are manufactured under one or more of the following patents licensed from British Telecommunications PLC :

**European** 143000;384764;416879;531377;890129;156566;227783;218344;279680;261943;390614;174729;228435;228435;242084;245085;746887;767923;830721;1181591;93527;3;1183561;170457;225015;247834;292328;320305;537237;624257;647327;94905188;2;691044;772924;782713;822425;822426;813761;97900375;3;97908417;5;97908417;5;865124;US 4826295;5426312;5481397;5202897;6008926;4734387;4728628;4935936;4754459;4964134;5242857;53329542;4736164;4817207;4981814;5015964;844929;5852696;6188511;6625371;6571037;959329/09;4744619;4793690;4879761;4969704;4973122;4995100;5216237;5371820;5656507;6075625;6229945;6097512;5719974;5832011;5917636;5841928;5978400;6104852;6052213;5974073;6178280; **Canada** 297211;1284683;2182591;2193095;2221693;2372581;2372401;2373546;1255485;1244519;1281802;1296887;1293996;2085596;2117682;2280472;2153798;2155528;2185132;2199513;2367133;2212736;2240519;2248042;1268848;2047196;2065247;2082939;2243279;1236554;1228936;1261483;265604;1295722;1332341;2049356; **Japan** 2837265;2968335;1000942;2134710;2547001;2935415;2140794;2708165;2984365;2018663;1868104;2670519;2128400;2764141;1957418;2664457;2081567;3117708;3404040;3556665;3346570;95-525482-97-525789-97-534136

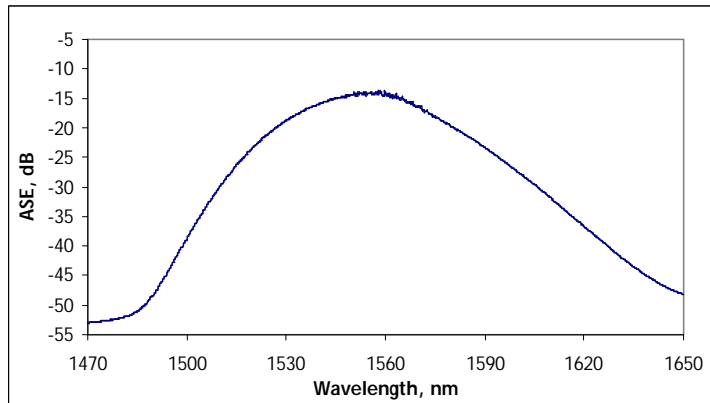
[www.ciphotonics.com](http://www.ciphotonics.com)

.....photonic solutions

CIP Technologies, Adastral Park, Martlesham Heath, Ipswich, IP5 3RE, UK Tel: +44 (0) 1473 663210 [info@ciphotonics.com](mailto:info@ciphotonics.com) REV: F

### Typical parameter curves

ASE curve for packaged device at chip temperature of 20°C and drive current of 500mA

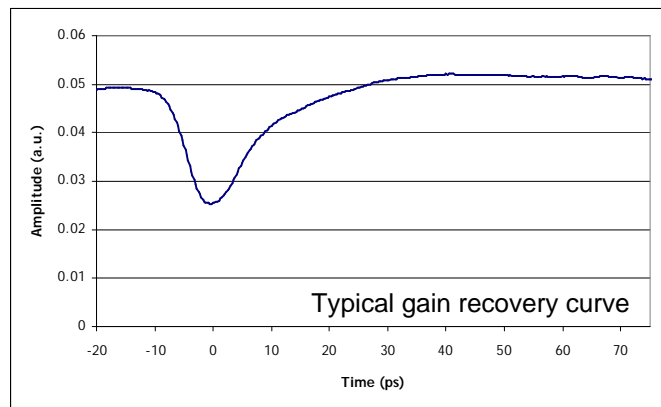


### Typical Non-Linear Results

For devices tested at 20°C at 500mA drive current. Pump/probe sampling measurements taken with:

Input 1550nm CW signal of 0.0dBm  
Pulses (3ps) @ 2.5GHz and a wavelength of 1539nm

The typical 1/e recovery time is ~10ps.





# Índice de figuras

2.1. Interferómetros usados típicamente en Óptica Integrada. . . . .	7
3.1. Caracterización del SOA-NL respecto de $I_{SOA}$ . . . . .	12
3.2. Caracterización del SOA-NL respecto de $\lambda$ . . . . .	12
3.3. Caracterización del SOA-NL respecto de $T_{SOA}$ . . . . .	13
3.4. Espectro de emisión del SOA-NL en función de $P_{IN}$ . . . . .	14
3.5. Caracterización de XGM del SOA-NL respecto de $\tau$ y de $P_{pump}$ . . . . .	15
3.6. Caracterización de XGM del SOA-NL respecto de $P_{pump}$ y de la diferencia entre $P_{pump}$ y $P_{probe}$ . . . . .	15
3.7. Caracterización de XPM del SOA-NL respecto de $P_{pump}$ y $P_{probe}$ . . . . .	16
3.8. Forma de onda del XPM y XGM. . . . .	17
4.1. Esquemático del conversor de longitud de onda con dos salidas, inversa y no inversa. . . . .	19
4.2. Montaje para la simulación del conversor de longitud de onda con modulación RZ. . . . .	21
4.3. Montaje para la simulación del conversor de longitud de onda con modulación NRZ. . . . .	21
4.4. Simulación del BER del conversor de longitud de onda para modulación RZ. . . . .	22
4.5. Diagramas de ojo del conversor de longitud de onda con modulación RZ. . . . .	23
4.6. Simulación del BER del conversor de longitud de onda para modulación NRZ. . . . .	24
4.7. Diagramas de ojo del conversor de longitud de onda con modulación NRZ. . . . .	24
4.8. Montaje para realizar la prueba de concepto del conversor de longitud de onda. . . . .	25
4.9. Fotografía del montaje utilizado en la prueba de concepto del conversor de longitud de onda. . . . .	25
4.10. Salidas del conversor de longitud de onda a $R = 2,5Gbps$ . . . . .	26
4.11. Salidas del conversor de longitud de onda a $R = 10Gbps$ . . . . .	26
4.12. Diseño del sistema integrado. . . . .	28
A.1. Estructura simplificada de bandas energéticas de un semiconductor de gap directo. . . . .	II
A.2. Transiciones radiativas en un modelo simplificado de dos niveles. . . . .	III
A.3. Transiciones no radiativas en un modelo simplificado de dos niveles. . . . .	IV
B.1. Montaje para la medida de la ganancia y la potencia de salida del SOA. . . . .	VII
B.2. Montaje para la medida de espectro de emisión del SOA. . . . .	IX
B.3. Montaje para la medida de XGM del SOA. . . . .	X
B.4. Montaje para la medida de XPM del SOA. . . . .	XII
B.5. Montaje para la simulación del conversor de longitud de onda con modulación RZ. . . . .	XIV
B.6. Montaje para la simulación del conversor de longitud de onda con modulación NRZ. . . . .	XV
B.7. Montaje para realizar la prueba de concepto del conversor de longitud de onda. . . . .	XVI
C.1. Disposición de las capas de las obleas de integración de la plataforma JePPIX. . . . .	XIX
C.2. Celda predefinida de la oblea de integración. . . . .	XX





# Índice de acrónimos

- ACC - Acoplador
- AMP - Amplificador RF
- APL - Aragón Photonics Labs
- ARC - Revestimiento antirreflejante o anti-reflection coating
- ASE - Ruido de Emisión Espontanea Amplificado
- ATT - Atenuador
- BER - Tasa de Error de Bits o Bit Error Rate
- BLE - Elemento lógico básico
- BOSA - High Resolution Optical Spectrum Analyser
- CB - Banda de Conducción
- CCCH - Recombinación Auger
- CH - Carrier Heating
- CHHL - Recombinación Auger
- CHHS - Recombinación Auger
- CIR - Circulador
- CW - Onda continua
- DCA - Digital Communication Analyzer
- DELEC - Delay Eléctrico
- DELOP - Delay Óptico
- DFB - Distributed Feedback Laser
- DWDM - Multiplexor por División de Longitud de onda Denso
- EDFA - Erbium Doped Fiber Amplifier
- FAL - Fuente de Alimentación
- FIL - Filtro sintonizable
- FP-SOA - Amplificador Óptico de Semiconductor Fabry-Perot

- FWM - Mezcla de Cuatro Ondas
- GEN - Generador de Señales
- HH - Banda de huecos pesados o Heavy Hole
- I3A - Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón
- JePPIX - Plataforma de integración fotónica del Instituto COBRA
- LH - Banda de huecos ligeros o Light Hole
- LUT - Tabla de consulta o look-up table
- MAIN - Mainframe
- MI - Interferómetro Michelson
- MMI2X2 - Interferómetro Multimodal 2X2
- MP - Medidor de Potencia
- MQW - Multiquantum Well
- MZI - Interferómetro Mach-Zehnder
- NOLM - Nonlinear Optical Loop Mirror
- NRZ - Modulación No Retorno a Cero
- NRZ MOD - Modulador NRZ
- OSA - Optical Spectrum Analyser
- PC - Ordenador
- PEGASO - Matrices de Puertas Lógicas basadas en Amplificadores Ópticos de Semiconductor
- POL - Control de Polarización
- PRBS - Secuencia Binaria Pseudoaleatoria
- QW - Quantum Well
- RZ - Modulación Retorno a Cero
- RZ MOD - Modulador RZ
- SHB - Spectral Hole Burning
- SI - Interferómetro Sagnac
- SO - Banda de Spin-Off
- SOA - Amplificador Óptico de Semiconductor
- SOA-MZI - Interferómetro Mach-Zehnder con Amplificadores Ópticos de Semiconductor
- SOA-NL - Amplificador Óptico de Semiconductor No Lineal
- SPM - Automodulación de fase

- TE - Polarización Transversal Eléctrica
- TLS - Tuneable Laser Source
- TM - Polarización Transversal Magnética
- TUE - Universidad Técnica de Eindhoven
- TW-SOA - Amplificador Óptico de Semiconductor Traveling Wave
- T-XPM - Transient Modulación de Fase Cruzada
- VPI - VPIphotonics
- XGM - Modulación de Ganancia Cruzada
- XPM - Modulación de Fase Cruzada